



**DANIEL
AMARAL DE
FIGUEIREDO**

**MICRO FRESAGEM DE LIGAS DE METAL DURO
UTILIZANDO FERRAMENTAS ESFÉRICAS COM
REVESTIMENTO DE DIAMANTE**



**DANIEL
AMARAL DE
FIGUEIREDO**

**MICRO FRESAGEM DE LIGAS DE METAL
DURO UTILIZANDO FERRAMENTAS ESFÉRICAS
COM REVESTIMENTO DE DIAMANTE**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

“Conhecer não é demonstrar nem explicar, é aceder à visão”

Antoine de Saint-Exupéry

o júri

presidente

Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa
professor associado do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
professor associado c/ Agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Paulo Davim pela orientação ao longo deste trabalho.

À PALBIT, SA e aos meus colegas de trabalho, a ajuda e os conhecimentos que me transmitiram, em especial o MEng. Renato Ferreira, a Dr.^a Cristina Fernandes.

Ao IPN e ao DEMAC pela colaboração.

A todos os meus amigos que me acompanharam e deram apoio, mas principalmente à pessoa que me deu mais suporte e motivação, a minha namorada Marlene.

Obrigado!

palavras-chave

Micro-fresagem, hard milling, revestimentos de diamante, HF-CVD, WC-Co, tribologia, efeito de escala, espessura crítica da apara

resumo

Os processos de micro fresagem e *hard milling* têm sido alvo de elevada expansão, ao mesmo tempo estes processos estão largamente dependentes de melhorias nas especificações das ferramentas, nos seus materiais e geometrias. O processo de micro-fresagem segue os princípios da fresagem convencional mas a mecânica do corte não passa pela simples aplicação de um efeito de escala. Uma das maiores diferenças envolvem a formação da apara e o efeito da espessa mínima da apara. Este trabalho apresenta alguns ensaios de corte em micro-fresagem onde é avaliada a formação da apara e o estado de acabamento das superfícies na maquinagem de metal duro sinterizado.

Este trabalho foi realizado na Palbit,SA. fazendo parte de um projecto interno que teve o objectivo de desenvolver e otimizar ferramenta de micro-fresagem feitas de metal duro com revestimento de HF-CVD de diamante com estruturas multi-camada para aplicação em materiais ultra duros.

Foram preparadas várias ferramentas de forma esférica para micro-fresagem, tendo sido caracterizadas e realizados ensaios de maquinagem onde foi possível avaliar a influência do material a maquinar e o seu efeito no fenómeno da espessura mínima de apara. Foi detectado um baixo efeito deste fenómeno mesmo com condições de espessura inferiores ao raio de aresta da ferramenta durante a fresagem de metal duro sinterizado. A vida útil das ferramentas e os modos de falha foram avaliadas confirmando um modo característico para todas as ferramentas testadas e ainda um superiores desempenho em estruturas de revestimentos de diamante particulares com combinações de multi-camadas de NCD e MCD. Nos ensaios ficou demonstrado o efeito que algumas alterações na preparação de aresta e superfície podem provocar no desempenho global da ferramenta.

keywords

Micro-milling, hard milling, diamond coatings, HF-CVD, WC-Co, tribology, scale effect, minimum chip thickness

abstract

The micro-milling processes and hard milling are in full expansion, at the same time the improvements of these process are largely dependent of tool definitions, design and materials. Although micro-milling is based on the same principle as macro-milling but the cutting mechanism of micro-cutting are not a simple scaling of normal process. A significant difference is the chip formation involving the phenomenon of minimum chip thickness. This work reports the cutting tests, chip formation and surface quality in micro-milling of hardmetal carbide from an experimental point of view.

This project was carried out at Palbit SA., and was part of one internal project with scope to develop and optimize carbide micro-milling tools with HF-CVD multilayers coatings for ultra-hard materials.

On this work several micro-ball nose tools were prepared and characterized and cutting tests were performed confirming the influence of the machined material on the minimum chip thickness phenomenon, detecting a lower effect on carbide micro milling, even with thickness conditions lowers than the tool radius. The tool life time and the failure mode of the tools were evaluated confirming a characteristic process of tool failure and superior performance of particular multilayer structures with NCD and MCD diamond combination. On the tool life cutting tests were detected the large influence of changes on the edges and surface preparation.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	VIII
1.INTRODUÇÃO	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objectivos do trabalho	2
1.3 Organização do trabalho.....	3
2. MICRO-FRESAGEM	4
2.1.Recentes Inovações e Aplicações.....	5
2.2.Mecanismo de Corte	9
2.3 Micro fresagem mecânica do corte	11
2.4. Definições das Ferramentas	13
2.4.1. Definições geométricas e parâmetros de corte	13
2.4.2 Micro geometria da aresta	19
2.3. Desgaste e vida útil da ferramenta	23
2.4. Materiais das ferramentas.....	25
2.4.1. Carbonetos Sinterizados.....	26
2.4.2. Cermets	26
2.4.3. Cerâmicos.....	26
2.4.4.Nitreto de Boro.....	27
2.4.5.Diamante	27
2.4.6. Revestimentos de diamante HFCVD.....	27
2.5. Metal duro	31
2.5.1. Estruturas de Metal duro e Aplicações	32
2.6.Síntese.....	32
3.MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. Classe de metal duro a maquinar e utilizada nas ferramentas.....	35
3.2. Geometria da Ferramenta	37
3.3. Preparação superfície e aresta	38
3.4. Deposição de filmes de diamante HFCVD	39
3.6 Centro de maquinaria CNC, fixação e suportes	40
3.7. Ensaio de vida útil na micro-fresagem.....	42
3.8. Medição da rugosidade.....	43
3.9. Microscopia Electrónica de Varrimento	44
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45

4.2.Caracterização dos revestimento nas ferramentas	46
4.2. Variação do comportamento da apara com a alteração da profundidade de corte.....	51
4.3. Variação do comportamento da apara com a alteração da velocidade de corte	53
4.4. Variação do comportamento da apara com a alteração da largura de corte.....	54
4.5. Variação do comportamento da apara com a alteração do avanço.....	56
4.6. Variação do comportamento da apara com a alteração da Classe de Metal duro.....	57
4.7. Ensaios de vida útil nas várias estruturas de revestimento	59
5.CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXO 1	76
ANEXO 2	78
ANEXO 3	82

Índice de Figuras

Figura 2.1.- Redução do custo nos materiais ultra duros -(Byrne et al. 2003).....	5
Figura 2.2.- Vida útil de várias classes de PCD na fresagem de cerâmicos impregnados HPL (Cook and Bossom 2000)...	6
Figura 2. 3- Exemplo de peças e ferramentas : A) peças processadas em vidro processadas por maquinagem com ferramentas de PCD (Zygo Corporation), B) Micro ferramenta de fresagem em PCD (NS TOOL CO.,LTD.).....	6
Figura 2. 4 –Exemplo de peça (MAKINO IQ300) e ferramentas em PCBN utilizadas na produção de moldes de injeção de peças para sistemas ópticos (exemplos da NSTools e Hitachi Tools).....	7
Figura 2. 5 – AA)Montagem experimental (1: spindle e instalação do laser, 2: suporte linear —X, Y and Z, 3: montagem do spindle, 4: Cabos de fibra optica, 5: montagem do micrometro); Imagem da ferramenta esférica usada na investigação (a) ferramenta nova; (b) imagem da ferramenta após uma distância de corte de 150 mm com laser; (c) imagem da ferramenta após uma distância de corte de 150 mm sem laser. (velocidade de corte: 32 m/min, profundidade de corte: 2,5 mm, avanço por dente: 1 mm/z, potência do Laser: 7.5 W). (Melkote et al. 2009)	8
Figura 2. 6 – Opções dos vários subsistemas no LRM (Davim 2013) (adapt.)	9
Figura 2. 7- Evolução do fabrico sustentável ciclo de vida do produto em ciclo fechado na abordagem 6R (Jayal et al. 2010)	9
Figura 2. 8 - Modelo da formação da apara (Nakayama et al., 1988) (adapt.)	10
Figura 2. 9 – Amostra obtida por paragem instantânea utilizando aço ligado com 56 HRC, a banda adiabática estende-se desde a aresta de corte até a superficial da peça (Barry and Byrne 2002).....	11
Figura 2. 10 – Representação do modelo formulado pela equação 1 (a) Condições normais; (b) Condições de espessura de corte reduzida (Liu and Melkote 2007).....	12
Figura 2. 11- Formação da apara e relação com a espessura da para na micro maquinagem – a) maquinagem convencional; b) micro-maquinagem (Aramcharoen, Mativenga, Yang, Cooke, & Teer, 2008) (Adapt.).....	13
Figura 2. 12- Geometria base para (a) torneamento e (b) ferramenta integral de fresagem (endmilling tools) (Lacalle et al. 2011) (adapt.).....	14
Figura 2. 13- De acordo com o sistema de referência <i>Tool-in-hand</i> para (a) torneamento (b) fresagem (Lacalle et al. 2011) (adapt.).....	14
Figura 2. 14- De acordo com o sistema de referência <i>Tool-in-hand</i> - Ferramentas usadas nos ensaios : ferramenta integral (a) <i>bull nose</i> , (b) <i>ball nose</i>	15
Figura 2. 15 – Geometria numa ferramenta integral de fresagem de topo raso - <i>endmill</i>	15
Figura 2. 16 – Geometria numa ferramenta integral de fresagem esférica: <i>ball nose endmill</i> (Lacalle et al. 2011).....	16
Figura 2. 17 – Representação do corte oblíquo com a decomposição das forças de corte e suas direcções (Lacalle et al. 2011).....	17
Figura 2. 18 – Ângulos base na avaliação rápida da ferramenta (Lacalle et al. 2011) (Adapt.).....	17
Figura 2. 19 – Representação do avanço por dente em fresagem concordante.....	18

Figura 2. 20 – Representação da profundidade de corte axial e radial e esquema da medição da espessura da apara para ferramentas esférica com e sem inclinação do plano de trabalho, (a) ferramenta esférica, (b) ferramenta topo raso com raio, (c) comparação da apara não deformada com ângulo de inclinação da peça (Sonawane and Joshi 2015)	19
Figura 2. 21- Aspectos gerais na definição do problema da micro geometria da aresta (Rodríguez 2009) (Adapt.).....	20
Figura 2. 22- Aspecto a considerar: (a) para uma sistemática preparação de aresta;(b) aspectos relacionado no desenvolvimento de uma nova ferramenta (Rodríguez 2009) (Adapt.)	21
Figura 2. 23- Factores que influenciam : (a) Selecção e design da geometria da aresta de corte, (b) A preparação de aresta durante o processo de corte, seu efeito.....	22
Figura 2. 24 – Caracterização do desgaste em fresas de acordo com a norma ISO 8688.....	23
Figura 2. 25 – Exemplo de modo de uma aresta usada na fresagem de aço ligado com fenómenos de fragmentação e desgaste de cratera (PALBIT).....	24
Figura 2. 26 - (a) Variação da dureza par vários materiais de ferramentas em função da temperatura. (a) Gama das propriedades nos vários grupos de materiais - (George 2002)	25
Figura 2. 27 – Estrutura unitária da rede do diamante (Neto 2007).....	29
Figura 2. 28 - Representação esquemática no HFCVD: (a) de um reator ; (b) do método de ativação e deposição (Spear, Dismukes, and Society 1994).....	29
Figura 2. 29 - Detalhe do diamante na superfície das ferramentas testadas em ensaios iniciais (PALBIT) : NCD em (A) e MCD em (B). Em B há aglomerados na superfície com cerca de 15-30 µm de diâmetro.....	30
Figura 2. 30- Microscopias ópticas (1500x) de classes de metal duro da Palbit: (a)ternária, sumicrométrica WC com 0,5 µm; (b) Ternária, WC com 3µm; (c) Binária WC com 6 µm.....	31
Figura 2. 31 – Aplicação e gama de durezas para diferentes classes de metal duro com diferentes composições de Co e tamanho de grãos de WC (Kazanowski, Aluminum, and Tubing 2012).....	32
Figura 3. 1 – Definição geométrica estudada e definida para os ensaios deste trabalho (PALBIT)	37
Figura 3. 2– Representação do processo utilizado para preparação de arestas e superfícies – jateamento em meio húmido (PALBIT).....	38
Figura 3. 3- Equipamento de ensaios da Cemecon CC800/DIA5 utilizado para processar os revestimento de diamante HFCVD	40
Figura 3. 5– Imagem do centro de fresagem CNC – MAKINO IQ300 (PALBIT)	41
Figura 3. 6 – Sistema de medição. exemplo da imagem obtida durante a medição da ferramenta utilizando o sistema de medição óptico interno da máquina IQ300.....	42
Figura 3. 7– Imagem da montagem utilizada para fixação dos corpo de prova no ensaios de maquinagem	42
Figura 3. 8– Imagem do equipamento e exemplo do controlo visual feito nas ferramentas durante o ensaio (PALBIT) ...	43
Figura 3. 9- Equipamento utilizado para medição da rugosidade e condições das arestas das ferramentas utilizadas no trabalho - Alicona Infinitefocus G5.....	44

Figura 4. 1– Imagem de SEM da estrutura e zona do interface sem Co: (A) Estutura Tipo A; (B) Estrutura Tipo B; (C) Estutura Tipo C ; (C) Estutura Tipo D.....	51
Figura 4. 2– Imagens –SEM(SU-70) das aparas : (a) $a_p = 0,015$ mm ; (b) $a_p = 0,05$ mm.....	52
Figura 4. 3– Gráfico da variação da Rugosidade em função vs Profundidade de corte- R_a , RMS (μm)	52
Figura 4. 4– Imagens –SEM(SU-70) das aparas : (a) $V_c = 30,5$ m/min ; (b) $V_c = 54,8$ m/min	53
Figura 4. 5– Gráfico da variação da Rugosidade em função vs velocidade de corte- R_a , RMS (μm).....	54
Figura 4. 6– Imagens –SEM(SU-70) das aparas: (a) $a_e = 0,02$ mm ; (b) $a_e = 0,11$ mm	55
Figura 4. 7– Gráfico da variação da Rugosidade em função da largura de corte- R_a , RMS (μm)	56
Figura 4. 8– Imagens –SEM(SU-70) das aparas: (a) $f_z = 0,006$ mm/z ; (b) $f_z = 0,012$ mm/z.....	56
Figura 4. 9– Variação da Rugosidade em função do avanço por dente- R_a , RMS (μm)	57
Figura 4. 10– Imagens –SEM(SU-70) das aparas: (a) CLASSE 1(Co15% -- WC3,0) ; (b) CLASSE 1(Co10%-- WC 0,8)	58
Figura 4. 11– Variação da Rugosidade em função da alteração da classe metal duro- R_a (μm)	58
Figura 4. 12– Gráfico das curvas T-Vb no ensaio de fresagem em cópia na Classe 1 (Co=15%-WC=3,0 μm) concordante/discordante -corte a seco com fluxo de ar a 5 bar.....	60
Figura 4. 13– Vida útil das ferramentas com a mesma estrutura de revestimento mas com tratamento de preparação de superfície diferentes.....	61
Figura 4. 14 – Vida útil da ferramenta com condições de profundidade de corte diferentes	61
Figura 4. 15 – Vida útil da ferramenta com condições de avanço por dente diferentes.....	62
Figura 4. 16 – Evolução do modo de falha da ferramenta Tipo A	63
Figura 4. 17 – Comparação entre a evolução do modo de falha da ferramenta Tipo A e B.....	64
Figura 4. 18 – Comparação entre a evolução do modo de falha da ferramenta com preparação de aresta COND 1 e COND 2	65
Figura 4. 19 – Falha característica das ferramentas Tipo A durante o ensaio de vida útil representado no gráfico da figura 4.15: (a) após 25 min; (b) após 55 min.....	66
Figura A. 1- Representação da estratégia utilizada para os ensaios de avaliação da apara (A) e ensaios de vida útil (B) (MASTERCAM 2017)	76
Figura A. 2– Exemplo do procedimento de medição dos parâmetros da rugosidade R_a e RMS	77
Figura A. 3– Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo A.....	78
Figura A. 4–Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo B.....	79
Figura A. 5– Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo C.....	80
Figura A. 6– Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo D	81

Figura A. 7– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $a_p=0,015$ mm ; (b) $a_p=0,05$ mm	82
Figura A. 8– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $V_c=30,5$ m/min ; (b) $V_c=54,8$ m/min	82
Figura A. 9– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $a_e=0,02$ mm ; (b) $a_e=0,11$ mm	82
Figura A. 10– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $f_z=0,006$ mm/z ; (b) $f_z=0,012$ mm/z.....	83
Figura A. 11– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) CLASSE 1(Co15% -- WC3,0) ; (b) CLASSE 1(Co10%--WC0,8)	83

Índice de Tabelas

Tabela 2. 1– Propriedade gerais das estrutura de diamante e CBN (Almeida, 2007a) (Adapt.).....	28
Tabela 3. 2 -Propriedades da classe de metal duro utilizada nas ferramentas de micro-fresagem (PALBIT)	35
Tabela 3. 3- Propriedades das classe de metal duro maquinadas durante os ensaios (PALBIT)	36
Tabela 3. 4– Definições geométricas macro das ferramentas (PALBIT).....	37
Tabela 3. 5- Condições de jactemanto em meio húmido utilizadas	38
Tabela 3. 6- Condições da aresta de corte e superfícies nas ferramentas após revestimento	39
Tabela 3. 7- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo A.....	47
Tabela 3. 8- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo B.....	48
Tabela 3. 9- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo C.....	49
Tabela 3. 10- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo D.....	50
Tabela 3. 11 – Características do centro de fresagem CNC utilizado no ensaio – Makino IQ300	41
Tabela 4. 1– Matriz de ensaios utilizada nos ensaios para avaliar a o comportamento da apara	45
Tabela 4. 2– Matriz de ensaios utilizada nos ensaios para avaliar vida útil das ferramentas	59
Tabela A. 5- Compilação de imagens da monitorização do desgaste durante o ensaio de vida útil na fresagem de Classe 1 (Co15%-WC3,0)	84

Lista de Abreviaturas e Símbolos

6R	Reduce, Reuse, Recycle, Recover, Redesign and Remanufacturing
A, B, C, m, nn	Coefficients do modelo de Johnson and Cook
AM	Additive manufacturing
a_p, a_e, a_c	Profundidade axial e radial
CNC	Computer aided design
CVD	Chemical vapour deposition
δ	Ângulo de inclinação da peça
D_c	Diâmetro de corte
EDM	Electrical Discharge Machining
Φ	Ângulo de corte característico do material
f_z	Avanço por dente
FSSS	Fisher Sub Sieve Sizer/Average Particle Size Analyzer
γ	Ângulo efectivo de corte
h	Espessura do material a cortar
HF-CVD	Hot Filament Chemical Vapor Deposition
HM	Hard Milling
h_m	Espessura crítica da apara
JC	Modelo constitutivo de Johnson and Cook
L	Comprimento da zona primária de corte
LRM	Laser Rapid Manufacturing
MCD	Diamante microcristalinos
MPCVD	<i>Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition</i>
MQL	Minimum Quantity Lubrication
MWCVD	<i>Micro-Wave Chemical Vapour Deposition</i>
N	Rotação do <i>spindle</i>
NCD	Diamante nanocristalinos

PCBN	<i>Polycrystalline cubic boron nitride</i>
PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i>
PECVD	<i>Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition</i>
P_f	Plano de trabalho
P_n	Plano normal à aresta
P_p	Plano anterior da ferramenta
P_r	Plano de referência da ferramenta
r_e	Raio na aresta
SG	<i>Strain gradient</i>
T	Temperatura da peça
T_0	Temperatura de transição da peça
T_{melt}	Temperatura de fusão da peça
$t_{n\delta}$	Aumento da espessura da apara em fresagem com ferramenta esférica em plano inclinado
VB	Desgaste de flanco (mm)
V_c	Velocidade de Corte (m/min)
V_f	Velocidade linear
WEDM	Wire electrical discharge machining
$w_{n\delta}$	Aumento da largura da apara em fresagem com ferramenta esférica em plano inclinado
z	Número de arestas de corte por ferramenta
$Z\delta$	Profundidade de corte em fresagem com ferramenta esférica em plano inclinado
α_n	Ângulo de saída (folga)
γ_n	Ângulo de ataque
ε	Deformação efectiva
κ'_r	Ângulo de posição da aresta secundária
κ_r	Ângulo de posição da aresta
λ_s	Ângulo de inclinação da aresta
σ	Tensão equivalente plástica
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação efectiva
$\dot{\varepsilon}_0$	Taxa de deformação efectiva de referência

1.Introdução

1.1. Generalidades

A definição de fresagem de materiais duros (“hard milling” - HM) está quase sempre relacionada com a fresagem em peças de dureza superior a 45 HRC. Os materiais mais comuns nesta aplicação são os aços com alto teor de liga, aços endurecidos por cementação, superligas de níquel, aços endurecidos por nitrução, com “cromoduro”, ligas obtidas por pulverometalurgia, etc. Nos últimos anos a maquinagem de materiais duros e ultra duros tem sido incrementada e a aplicação da fresagem directa em classes de metal duro tem ocupado o tempo de muitos investigadores, produtores de máquinas/ferramentas e responsáveis pelo processo de fresagem.

A possibilidade da fresagem directa das classes de metal duro permite aumentar a produtividade dos processos de fabrico, conseguindo elevada redução nos ciclos de produção em comparação aos métodos mais convencionais de EDM, WEDM e rectificação. Por outro lado o processo de maquinagem de materiais duros, em particular a fresagem de classes de metal duro não segue de forma linear a mecânica tradicional do corte por arranque de aparas, a estrutura compósita das classes de metal duro e o nível de dureza introduzem alterações na mecânica do corte e limitações no processo (Davim, 2011).

A fresagem de material ultra duro está quase sempre relacionada com a geração de superfícies de grande qualidade. O estudo desta aplicação ainda não é comum e torna-se importante melhorar a interpretação da mecânica do processo e influência das ferramentas (material e geometria).

Os recentes desenvolvimentos nas ferramentas de diamante policristalino (PCD), nas ferramentas com revestimento de diamante ou nas ferramentas com diamante monocristalino têm impulsionado os trabalhos neste campo de aplicação e tornou possível obter em condições controladas a maquinagem de algumas classes de metal duro. Em particular as propriedades únicas do diamante têm permitido aumentar a aplicação do processo de maquinagem a outros materiais. Os recentes desenvolvimento nas técnicas de deposição dos filmes e cristalização de diamante, utilizando gases a baixa pressão têm sido de grande importância. As tecnologias de deposição química em fase de vapor (CVD) de filmes em combinação com inovadoras ferramentas e o desenvolvimento nos vários processos da sua produção têm aberto uma janela alargada de inovações, novas propriedades e superiores desempenhos. Nas aplicações de fresagem materiais duros, o revestimento de diamante por processo de CVD, não apenas melhora a produtividade mas também permite o desenvolvimento de novos produtos dada a sua flexibilidade. As estruturas de revestimento de diamante serve primordialmente como filme protector de desgaste, as superfícies inertes com estruturas cristalinas compostas por diferentes camadas, diferentes orientações e combinações compostas tem se mostrado a melhor solução para a micro fresagem com ferramentas integrais de metal duro, permite a utilização de elevadas velocidades de corte e facilita a fresagem a seco ou com técnicas de mínima quantidade de lubrificante (MQL). No entanto quando o factor de escala na micro fresagem é muito relevante, o mecanismo de corte e a deformação do material é muito menor em comparação com o raio da aresta. Estas

condições alteram os ângulos de ataque e tornam-se muito relevantes na mecânica do corte, as diferenças ainda são mais relevantes quando são processados materiais compósitos de elevada dureza como o metal duro, estas variáveis promovem variações nas temperaturas de corte, nas forças e na deformação dos materiais. Os mecanismos de falha são alterados e interferem nas estruturas de revestimento que protegem as aresta de corte.

O controlo de todas as variáveis do processo de corte permite otimizar o processo de fresagem directa de metal duro, caso contrário a produtividade do processo fica comprometida e os custos associados podem aumentar inviabilizando a aplicação. Neste trabalho será avaliada a influência de algumas variáveis do processo de micro fresagem directa em classes de metal duro.

Existem uma elevada potencialidade nos processos de maquinagem de materiais duros, desde logo as possíveis melhorias nas questões ambientais e a produtividade em relação ao processo tradicionais, no entanto a sua utilização ainda não tem grande disseminação nas aplicações industriais. Normalmente está relacionada com alguma falta de controlo na integridade superficial processada, na precisão atingida e nos custos globais envolvidos. A qualidade das superfícies processada está tipicamente definida pelas texturas das superfícies, rugosidade, defeitos de forma, etc, e tolerâncias dimensionais. Na fresagem de materiais ultra duro existem efeitos indesejados que devem ser acautelados, desde logo os danos processados nas superfícies que podem afectar a resistência à fadiga e a resistência à corrosão.

A Palbit® é uma empresa portuguesa de excelência criada há mais de cem anos, que trabalha na produção desenvolvimento e investigação de ferramentas e metal duro ultra duros e aços e fornece uma vasta gama de soluções para as áreas de negócio de ferramentas de corte, peças anti-desgaste e ferramentas para tratamento de pedra. O tema desta dissertação de mestrado surgiu de uma parceria com a empresa, e foi inserido num projecto de IDI da Palbit que têm como principal objectivo desenvolver ferramentas de micro fresagem para maquinagem directa de material ultra duros.

1.2. Objectivos do trabalho

Pretende-se com este trabalho avaliar algumas variáveis do processo de micro-fresagem directa de classes de metal duro avaliando a maquinabilidade e modos de falha da ferramenta e comportamento de diversas estruturas de revestimento de HF-CVD de diamante.

Esta análise é feita tendo como alvo os seguintes objectivos:

- i. Estudar a mecânica de corte de uma micro ferramenta na fresagem de duas classes de metal duro;
- ii. Estudar o efeito da profundidade corte, avanços e velocidade de corte no processo da micro-fresagem na de classes de metal duro;
- iii. Avaliar o acabamento da superfície maquinada (rugosimetria);
- iii. Avaliar o desgaste de micro fresas e modos de falha.

Com base nos objectivos anteriormente enunciados, pretende-se ainda realizar uma caracterização e avaliação do desempenho da ferramentas utilizando diferentes estruturas de revestimento HF-CVD em diamante.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos e está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 1 “Introdução” é efectuada uma introdução ao presente trabalho.

No Capítulo 2 –Revisão bibliográfica, inovações e aplicação, descrição e revisão sobre a mecânica do corte, fresagem e micro fresagem, e definições das ferramentas;

No Capítulo 3- Descrição dos materiais e métodos utilizados nos ensaios e estudo;

No Capítulo 4- Apresentação dos resultados obtidos e discussão;

No Capítulo 5 – Conclusão e trabalhos futuros.

Por último são apresentadas as referências e bibliográfica.

2. Micro-Fresagem

2.1.Recentes Inovações e Aplicações

A avaliação do custo no processo de corte por arranque da peça e a produção economicamente eficiente é sempre o tema central, Byrne *et al.* (2003) apresentaram esta evolução dos custos de forma detalhada mostrando a alteração nos discos de PCD e PCBN desde 1970. Para que a maquinagem seja economicamente viável é crítica a evolução nas ferramentas e materiais a utilizar permitindo o aumento não apenas nas velocidades de corte mas também nas taxas de avanço. O custo unitário dos materiais das ferramentas é visível no exemplo dos discos de PCD que apresentam uma elevada redução (Figura 2.1). Na prática a introdução de valor nos produtos e nas peças acontece essencialmente durante o tempo de operação. Processos convencionais como a rectificação e torneamento estão na maioria das vezes economicamente controlados do ponto de vista da produtividade, o importante neste momento é analisar o tempo de produção e “redesenhar” permitindo a redução do tempo produtivo. Neste sentido é primordial eliminar operações. Por exemplo, substituir a rectificação por torneamento directo em materiais duros, processar materiais por processo de adição de material combinando esta com operações de acabamento, substituir processo de EDM por maquinagem directa ou tecnologia de maquinagem laser.

Os métodos de optimização do processo de maquinagem são essenciais para a melhoria contínua nos produtos e processo, é cada vez mais importante modelar as inputs e outputs, a relação entre variáveis e determinação das condições óptimas de corte. No entanto nem sempre é simples modelos matemáticos de custo efectivo, existindo uma contínua actividade de investigação nesta área. Mukherjee *et al.*, (2006) apresentaram e classificaram vários modelos de optimização e técnicas, classificando-as segundo vários critérios apresentando também as vantagens e limitações das várias tecnológicas.

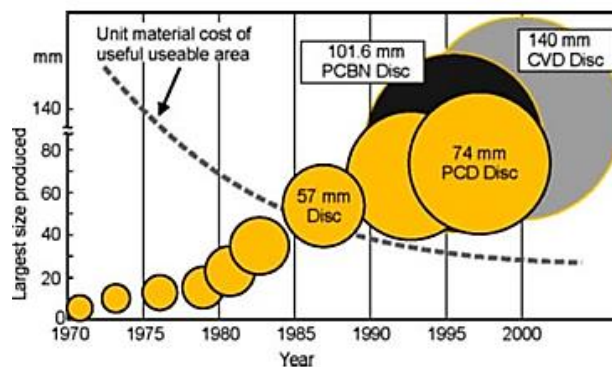


Figura 2.1.- Redução do custo nos materiais ultra duros -(Byrne, Dornfeld e Denkena, 2003)

As tendências na maquinagem são quase sempre influenciadas pelo desenvolvimento dos materiais, o diamante policristalino (PCD) e o nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) são muitas vezes os materiais com maior performance nestas novas aplicações e tendências. A alta velocidade de corte e maquinagem a seco são bons exemplos para demonstrar as vantagens destes materiais nas ferramentas de

corte, aplicações reais demonstram um aumento substancial na viabilidade económica da aplicação destes materiais nas ferramentas (Cook et al., 2000). Os desenvolvimentos feitos destes dois grupos de materiais permitiram nos últimos anos um elevado aumento nas aplicações industriais, o estudo representado no gráfico da Figura 2.2 apresenta as potencialidade do PCD relacionando o tamanho dos grão de diamante com a vida útil das ferramentas, no entanto a potencialidade destes materiais não fica encerrada nesta variável, é possível nos dias de hoje processa o PCD com estruturas compostas com múltiplos tamanhos de grão de diamante, diversos ligantes etc.

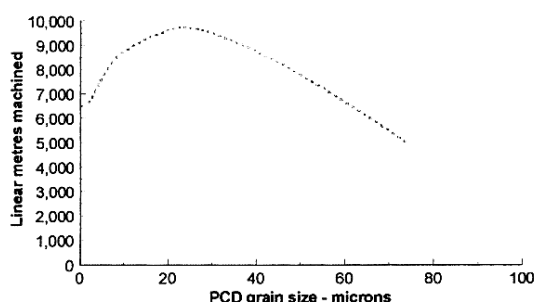


Figura 2.2- Vida útil de várias classes de PCD na fresagem de cerâmicos impregnados HPL (Cook e Bossom, 2000)

As potencialidades das ferramentas de PCD na maquinagem de materiais muito abrasivos e de extrema dureza tem sido impulsionadas e são neste momento utilizadas regularmente na maquinagem de cerâmicos e estruturas de vidro (Figura 2. 3).



Figura 2. 3- Exemplo de peças e ferramentas : A) peças processadas em vidro processadas por maquinagem com ferramentas de PCD (Zygo Corporation), B) Micro ferramenta de fresagem em PCD (NS TOOL CO.,LTD.)

Um exemplo das mais recentes aplicações que utilizam ferramentas PCBN são a produção de moldes de injeção de peças para o sector óptico. Nestes “micro” moldes (em materiais ferrosos de elevada dureza – $HRC > 60$) é necessário processar geometrias tridimensionais complexas, sendo quase impossível processar as geometrias com recurso a ferramentas tradicionais, nestes casos são cada vez mais utilizadas as ferramentas de PCBN como as apresentadas na Figura 2. 4.

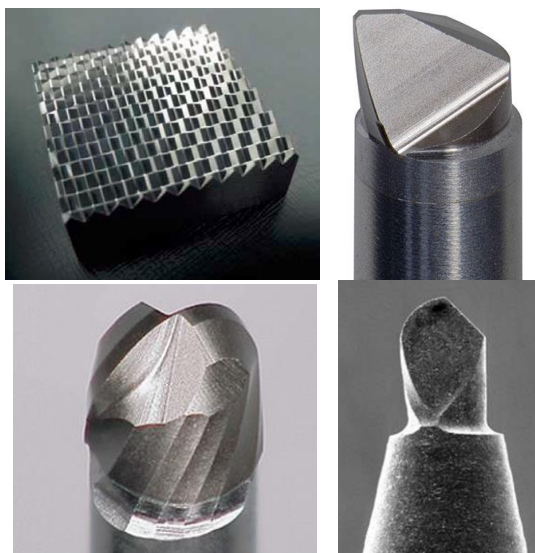
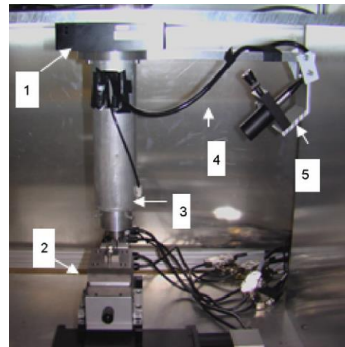


Figura 2. 4 –Exemplo de peça (MAKINO IQ300) e ferramentas em PCBN utilizadas na produção de moldes de injeção de peças para sistemas ópticos (exemplos da NSTools e Hitachi Tools)

Recentes inovações nas tecnologias laser aplicadas à fabricação e micro fabricação têm permitido a produção de micro estrutura numa alargada gama de materiais. As técnicas recentemente investigada com grandes vantagens nos métodos de produção do micro fabrico, estão apresentadas e resumidas nos trabalhos de Dornfeld, *et al.*, (2006); Masuzawa, (2000). No entanto a geometria das peças e a precisão do material removido na micro fresagem apresenta algumas limitações, no que se relaciona com a máquina ou com a ferramenta, a esbelteza, resistências das estruturas e das ferramentas. Por outro lado o elevado desgaste das ferramentas é um grande problema e provoca um impacto muito negativo (Bissacco *et al.*, 2005; Melkote *et al.*, 2009).

Uma forma de ultrapassar as limitações do processo de micro fresagem é a utilização do processo térmicos induzidos pelo laser de forma controlada e localizada, o trabalho de Jeon *et al.*, (2008) apresentou as vantagens e potencial de processar um pré-tratamento térmico do material durante a micro fresagem com recurso a laser. O trabalho experimental de Melkote *et al.*, (2009) demonstra de forma clara o efeito do laser no auxílio da micro fresagem apresentando o resultado nas peças de materiais de elevada dureza mas também o efeito directo no comportamento da ferramenta como pode ser visualizado na Figura 2. 5.



AA)

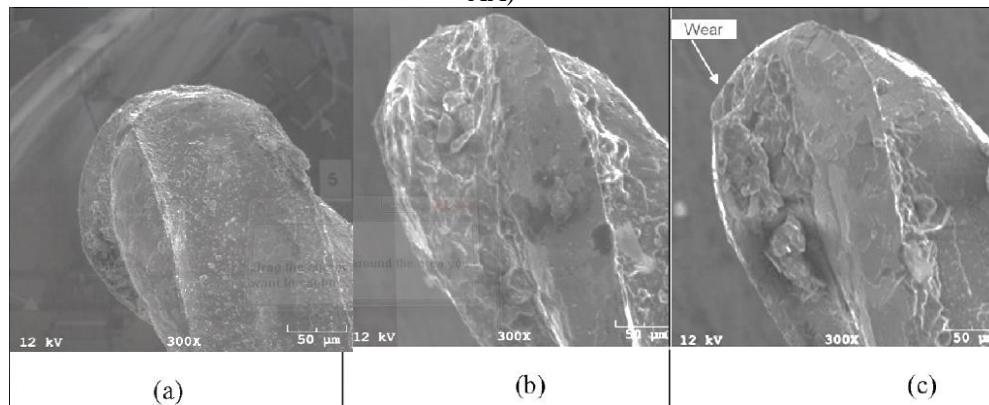


Figura 2. 5 – AA)Montagem experimental (1: *spindle* e instalação do laser, 2: suporte linear —X, Y and Z, 3: montagem do *spindle*, 4: Cabos de fibra óptica, 5: montagem do micrometro); Imagem da ferramenta esférica usada na investigação (a) ferramenta nova; (b) imagem da ferramenta após uma distância de corte de 150 mm com laser; (c) imagem da ferramenta após uma distância de corte de 150 mm sem laser. (velocidade de corte: 32 m/min, profundidade de corte: 2,5 µm, avanço por dente: 1 µm/z, potência do Laser: 7.5 W). (Melkote et al., 2009)

Dado as propriedade únicas do laser ele apresenta-se com um risco e ao mesmo tempo uma oportunidade, sendo nos dias de hoje cada vez mais utilizado para resolver grandes problemas (Davim, 2013). A possibilidade do laser aquecer, fundir e vaporizar são cada vez mais exploradas na maquinagem, soldadura, tempera, adição etc.

No *Laser Rapid Manufacturing* (LRM) a possibilidade de adicionar material permite processar/fabricar componente directamente do modelo sólido 3D definido num software de CAD. A Figura 2. 6 apresenta as opções dos vários subsistemas no LRM

Os sistemas de produção LRM são compostos pelos seguintes subsistemas:

- a) o sistemas de potência;
- b) o sistema de alimentação do material;
- c) a unidade de controlo numérico;

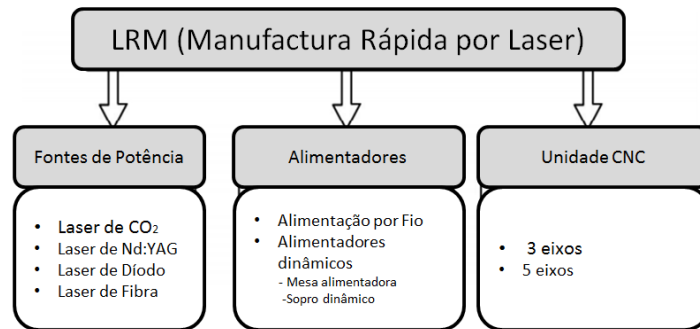


Figura 2. 6 – Opções dos vários subsistemas no LRM (Davim, 2013) (adapt.)

As metas da sustentabilidade na maquinagem precisam uma visão periférica e abrangente , não apenas focada nas ferramentas, produtos ou processos de maquinagem envolvidos (Nee, 2013). Jayal *et al.*, (2010) apresentaram uma visão geral das tendências recentes e novos conceitos no desenvolvimento de produtos, processos e sistemas sustentáveis, no seu trabalho foi apresentado o desenvolvimento de melhores métodos de pontuação de sustentabilidade para produtos e processos, modelos preditivos e técnicas de otimização para processos de fabrico sustentáveis, com uma visão aprofundada na maquinagem a seco, quase seca e criogénica, na Figura 2. 7 é esquematizada a visão apresentada.

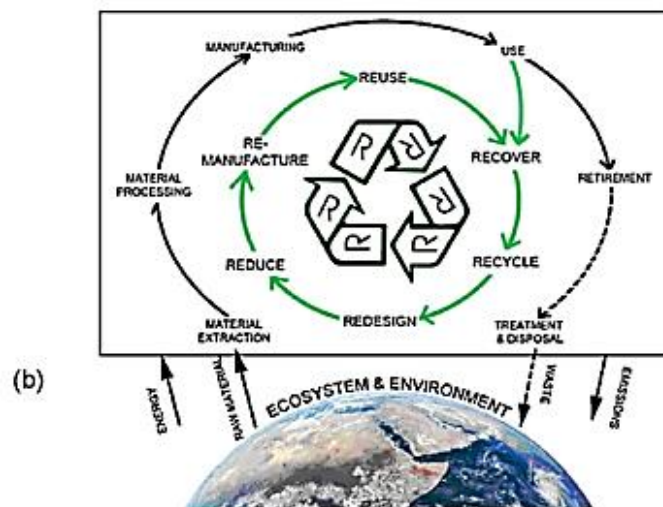


Figura 2. 7- Evolução do fabrico sustentável ciclo de vida do produto em ciclo fechado na abordagem 6R (Jayal et al., 2010)

2.2.Mecanismo de Corte

O estudo da mecânica de corte no processo de fresagem de materiais duros (HM) tem ainda poucas publicações que avaliem a mecânica do corte existentes neste tipo de maquinagem (Astakhov, 2011). No resumo da avaliação feita por Astakhov, (2011), é referida a falta de definição para a mecânica do corte e

apresentada a explicação com base nos resultados práticos apresentados por vários autores, que também diz não serem completamente consensuais com a avaliação feita por empresas de referência na produção de ferramentas. Nesta avaliação feita ao estudo de Nakayama *et al.*, (1988), destacado por Astakhov, o processo de corte por arranque de apara em materiais duros afasta-se da maquinagem convencional, e reforça que muito dos conceitos teóricos não se aplicam. De acordo com este trabalho pode ser apresentado o seguinte:

- No HM, as chamadas “aparas dentes de serra” (*saw-toothed chip*) são formadas durante a fractura do material a maquinar (Figura 2. 8). A fractura é iniciada na superfície da peça com o atingir do limite da tensão de ruptura. Por este motivo a fractura controla o processo de formação da apara.

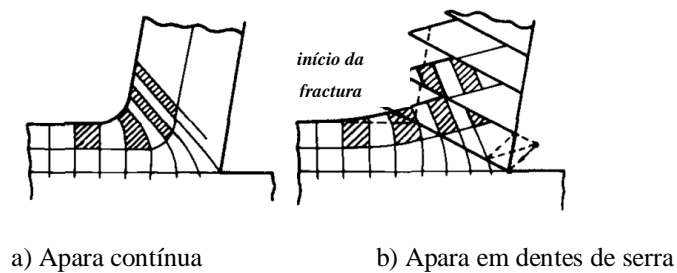


Figura 2. 8 - Modelo da formação da apara (Nakayama et al., 1988) (adapt.)

- O segmento da apara formado nestes materiais por efeito de um corte adiabático tem uma secção transversal em forma de dentes de serra apresentando um mecanismo muito diferente do apara contínua (Figura 2. 9);
- O ângulo de corte é muito pequeno em comparação com a maquinagem convencional. Este é significativamente aumentado pela dureza da peça e muito pouco afectado pelo ângulo de ataque da ferramenta;
- No HM a componente radial do corte é maior que a componente tangencial e é aumentada de forma diferente pela alteração do desgaste de flanco. Este fenómeno é atribuído ao efeito de recuperação elástica do material;
- As componentes tangencial e radial das forças de corte estão relacionadas com o ângulo de ataque da ferramenta. Desta forma quando o ângulo de ataque é zero, estas componentes não aumentam com a dureza do material. No entanto quando o ângulo de ataque é de -20° , estas componentes das forças são reduzidas com o aumento da dureza do material;
- A componente tangencial e radial das forças de corte são afectadas pelo desgaste de flanco de forma diferente. A componente radial aumenta quatro vezes quando o desgaste aumenta de 0 para 0,2 mm;
- O rácio de compressão da apara da apara é aproximadamente igual a 2.

Ficam por explicar nos trabalhos experimentais de Nakayama os seguintes pontos:

- Não é claro o comportamento do mecanismo de corte em materiais diferentes dos utilizados. Existem várias aplicações em materiais de elevada dureza como são os casos de alguns ferros fundidos, onde o comportamento da mecânica da formação da apara poderá ser diferente por serem materiais menos dúcteis.

Por outro lado em materiais de elevada dureza e compósitos, como são o caso das classes de metal duro testadas neste trabalho, o comportamento pode não ser repetido;

- O modelo de formação da apana apresentado não é claro e não fica explicado o limite de tensão de rotura que acontece na superfície da peça;
- É normal que as componentes radiais e tangenciais da forças de corte sejam afectadas pela dureza do material, qual será o comportamento com ângulos de ataque negativo;
- Não foram analisadas possíveis diferenças entre o ângulo de corte e a propagação da fractura;
- A geração de calor e aumento da temperatura têm uma influência directa no processo de corte e não foi avaliada esta variável;
- Nos processos de maquinagem de materiais duros as elevadas forças geradas são propícias à geração de instabilidade no processo de corte. Este é um factor de grande influência que não foi avaliado (Astakhov 2011);

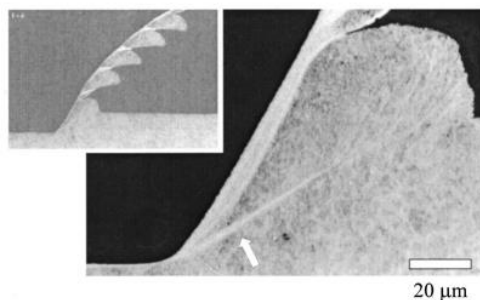


Figura 2. 9 – Amostra obtida por paragem instantânea utilizando aço ligado com 56 HRC, a banda adiabática estende-se desde a aresta de corte até a superficial da peça (Barry e Byrne, 2002)

2.3 Micro fresagem mecânica do corte

Na micro fresagem o efeito de escala e as condições das arestas de corte afectam a mecânica do corte. A maioria dos modelos convencionais assumem que as arestas são perfeitas e os materiais homogêneos. No entanto na micro fresagem estas variáveis são amplificadas. Na avaliação da micro fresagem não se pode apenas processar um factor de escala da fresagem convencional. Apesar disto é possível encontrar ligações (Vinet e Zhedanov, 2010). Existe um enorme número de variáveis relacionadas com a micro fresagem que são substancialmente diferentes da fresagem convencional. Desde logo as micro estruturas dos materiais, a geração das micro superfícies maquinadas.

Quando as condições e parâmetros de maquinagem, como por exemplo a profundidade de corte, estão na mesma ordem de grandeza do raio nas arestas de corte, o ângulo efectivo de ataque torna-se extremamente negativo. O efeito resultante deste efeito de escala, em especial a espessura crítica da apana e a relação com o raio da aresta, tornam-se dominantes no mecanismo de corte e na performance das micro

ferramentas. Nestas condições o mecanismo de corte foi avaliado por vários investigadores sendo a mecânica deste processo e o conhecimento suportados pelos seguintes temas: mínima espessura de corte, energia específica de corte, modelo de maquinagem dúctil e geração da superfície e rebarbas (Cheng e Huo, 2013).

Os materiais de elevada dureza e baixa ductilidade podem ser fresados em condições de “modo dúctil”. Para conseguir este estado as condições de profundidade de corte e avanço devem ser muito reduzidas, com valores abaixo dos 500 µm. No trabalho desenvolvido por Lai, Li, Li, Lin, & Ni, (2008), ficou comprovado que na micro maquinagem a influencia de profundidade de corte crítica pode ser descrita utilizando a equação constitutiva de plasticidade SG (*Strain gradient*) (Fleck & Hutchinson, 1993). No entanto a avaliação foi feita com uma liga de cobre e pode não ter uma aplicação directa nos materiais frágeis e de elevada dureza. Na equação 1 é apresentado o modelo constitutivo definido por Johnson and Cook (1983) e alterado por Lai et al. (2008).

$$\sigma_{JC} = [A + B(\epsilon)^{mn}] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

De acordo com os investigadores o modelo definido parece ter elevado potencial com base no SG sendo função de L , comprimento da zona primária de corte (Figura 2. 10.) e da espessura não cortada da apara. O modelo apresentado apresenta a vantagem de descrever a micro maquinagem, incluindo as características da resistência do material e o efeito da espessura mínima da apara. Por outro lado por se basear no modelo de *Johnson & Cook* entra em consideração com a dureza do material e as temperaturas geradas no processo de corte.

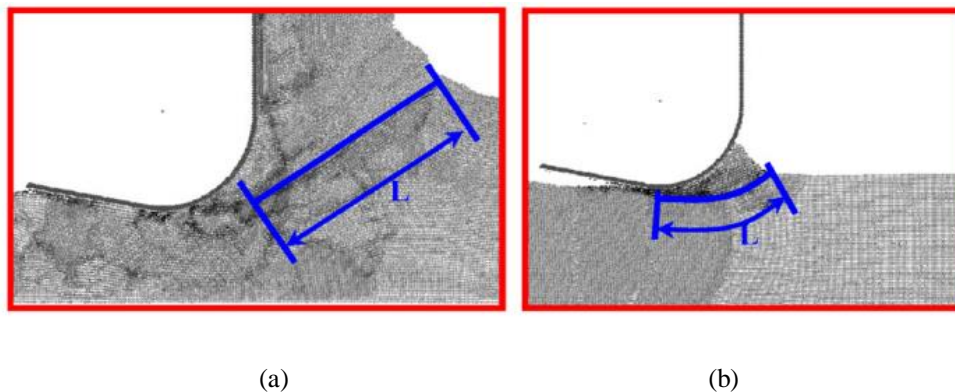


Figura 2. 10 – Representação do modelo formulado pela equação 1 (a) Condições normais; (b) Condições de espessura de corte reduzida (Liu e Melkote, 2007)

No entanto neste mesmo modelo as condições de corte são muito afectadas pelas pequenas vibrações e variações nas forças de corte, podendo estas à partida afectar a vida útil da ferramenta e as condições de controlo dimensional. É muito difícil controlar as condições das arestas de corte e o recurso a monitorização avançada do processo de corte é muitas vezes uma solução relevante (Chae, Park e Freiheit, 2006; Lu e Liang, 2017; Tansel *et al.*, 1998). Porém nestas condições a medição das forças de corte é um

desafio. Por outro lado a previsão das forças de corte utilizando a teoria de Merchant's (Merchant, 1945) não é possível por existir um aumento relativo do efeito dos raios nas arestas, produzindo um efeito elastoplástico.

O efeito da interação entre a ferramenta e a peça introduz algumas limitações na micro-fresagem. A formação da apara não existe sempre que a profundidade de corte é menor que a espessura de apara crítica. Devido aos efeitos elásticos que existem, as aparas podem ser muito pequenas e, nesse caso, o processo de micro fresagem pode tornar-se instável (Figura 2. 11).

Por outro lado existem limitações grandes no que se relaciona com a resistência das ferramentas já que o efeito de escala transforma a geometria global da ferramenta em corpos de reduzida resistência (Dow, Miller, & Garrard, 2004).

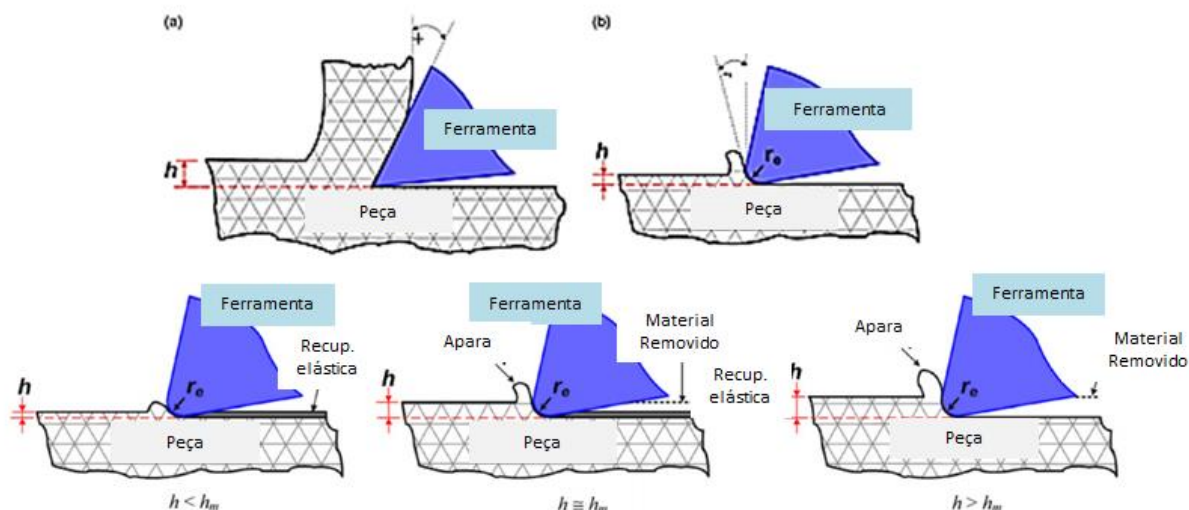


Figura 2. 11- Formação da apara e relação com a espessura da peça na micro maquinagem – (a) maquinagem convencional; (b) micro-maquinagem (Aramcharoen, Mativenga, Yang, Cooke, & Teer, 2008) (Adapt.)

2.4. Definições das Ferramentas

2.4.1. Definições geométricas e parâmetros de corte

Para definir a geometria de uma ferramenta de forma clara, existem uma série de ângulos, planos de referência, raios, eixos, etc. A forma das arestas e os ângulos relativos são influenciadores do processo de corte e de performance da ferramenta. A geometria básica para torneamento e fresagem é apresentada na Figura 2. 12.

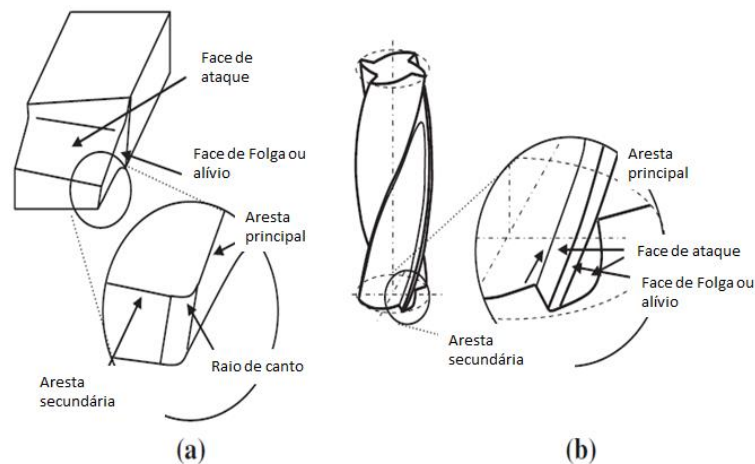


Figura 2. 12- Geometria base para (a) torneamento e (b) ferramenta integral de fresagem (*endmilling tools*) (Lacalle *et al.*, 2011) (adapt.)

Na Figura 2. 13 e 2.14 de acordo com a norma ISO 3002/1 onde dois sistemas de planos de referência são apresentados: descrito por *tool-in-hand* e *tool-in-use*.

- Pr - Plano de referência da ferramenta, paralelo a base da ferramenta ou contendo o eixo de rotação da ferramenta;
- Pf - Plano de trabalho, perpendicular a Pr e que contém a direção do avanço;
- Pp - Plano anterior da ferramenta, perpendicular a Pr and Pf ;
- Pn - Plano normal à aresta, perpendicular à aresta em cada ponto

Usando os seguintes planos alguns ângulos são medidos:

- κ_r - Ângulo de posição da aresta (medido em Pr);
- κ'_r - Ângulo de posição da aresta secundária (medido em Pr);
- γ_n - Ângulo de ataque (*normal rake angle*) (medido em Pn);
- α_n - Ângulo de saída (folga) *normal clearance* (medido em Pn);
- λ_s - Ângulo de inclinação da aresta - *edge inclination angle* (medido em Ps);

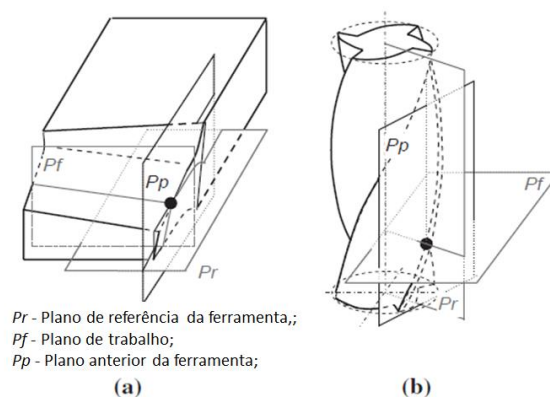


Figura 2. 13- De acordo com o sistema de referência *Tool-in-hand* para (a) torneamento (b) fresagem (Lacalle *et al.*, 2011) (adapt.)

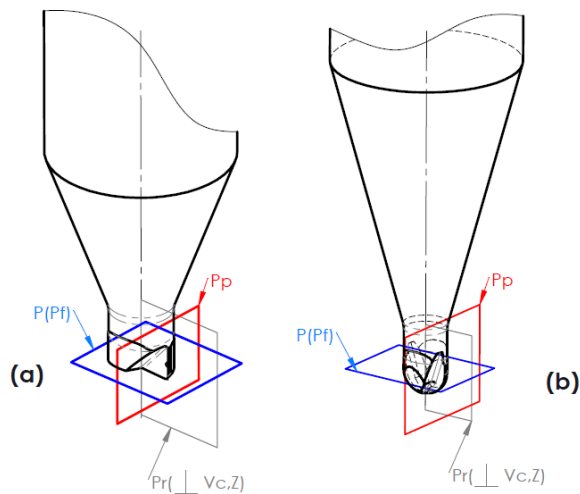


Figura 2. 14- De acordo com o sistema de referência *Tool-in-hand* - Ferramentas usadas nos ensaios : ferramenta 1 (a) bull nose , (b) ball nose

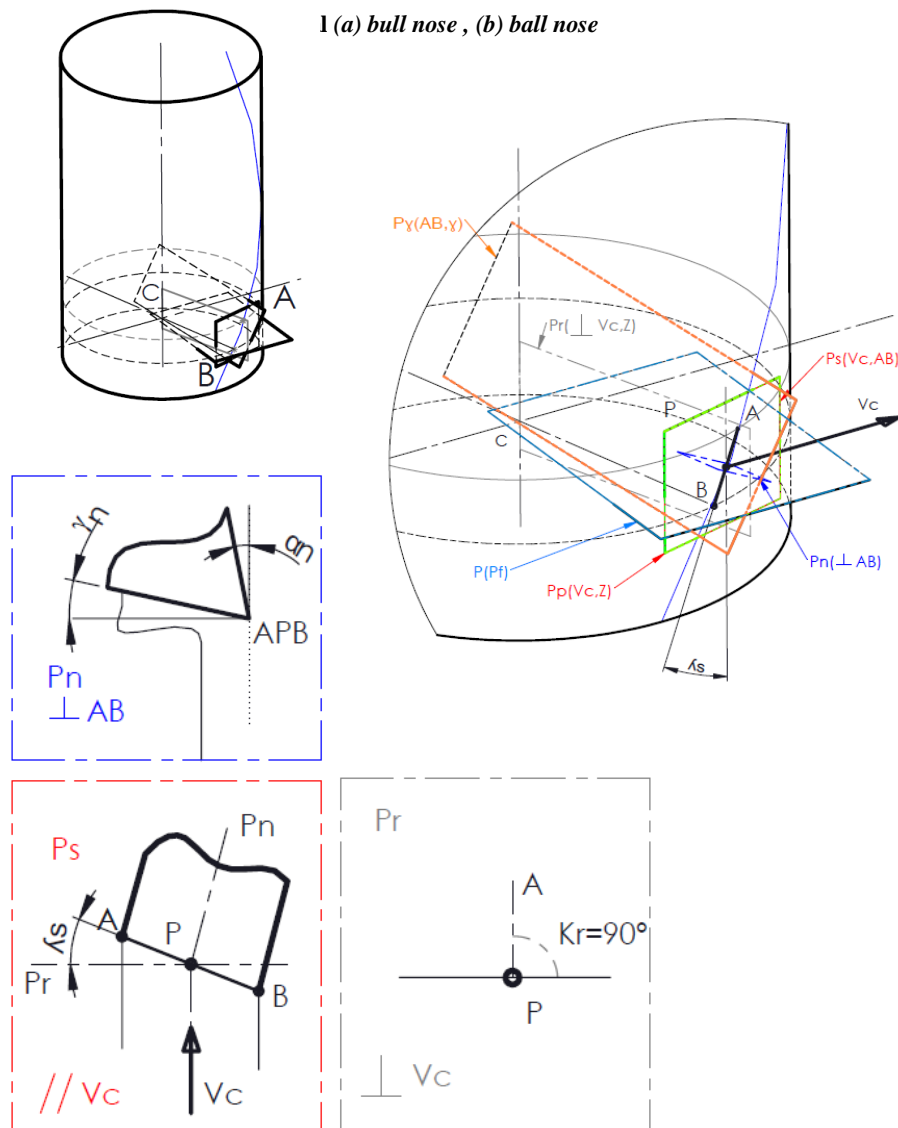


Figura 2. 15 – Geometria numa ferramenta integral de fresagem de topo raso - *endmill*

A grande diferença entre a ferramenta de topo raso e uma ferramenta de fresagem esférica está na variação do ângulo da hélice ao longo da aresta, mesmo considerando um ângulo de hélice constante ou igual a zero. Esta definição está muito relacionada com o processo de rectificação que normalmente é utilizado na produção da ferramenta, porém o processamento por laser e EDM é cada vez mais comum e tem aumentado a flexibilidade no design das ferramentas.

A geração no espaço da aresta é resultado da projecção cilíndrica da hélice ou na esfera numa direcção perpendicular ao eixo da ferramenta. A aresta de corte resultante é apresentada em detalhe nas Figura 2. 15 e 2.16 segundo a nomenclatura da norma ISO.

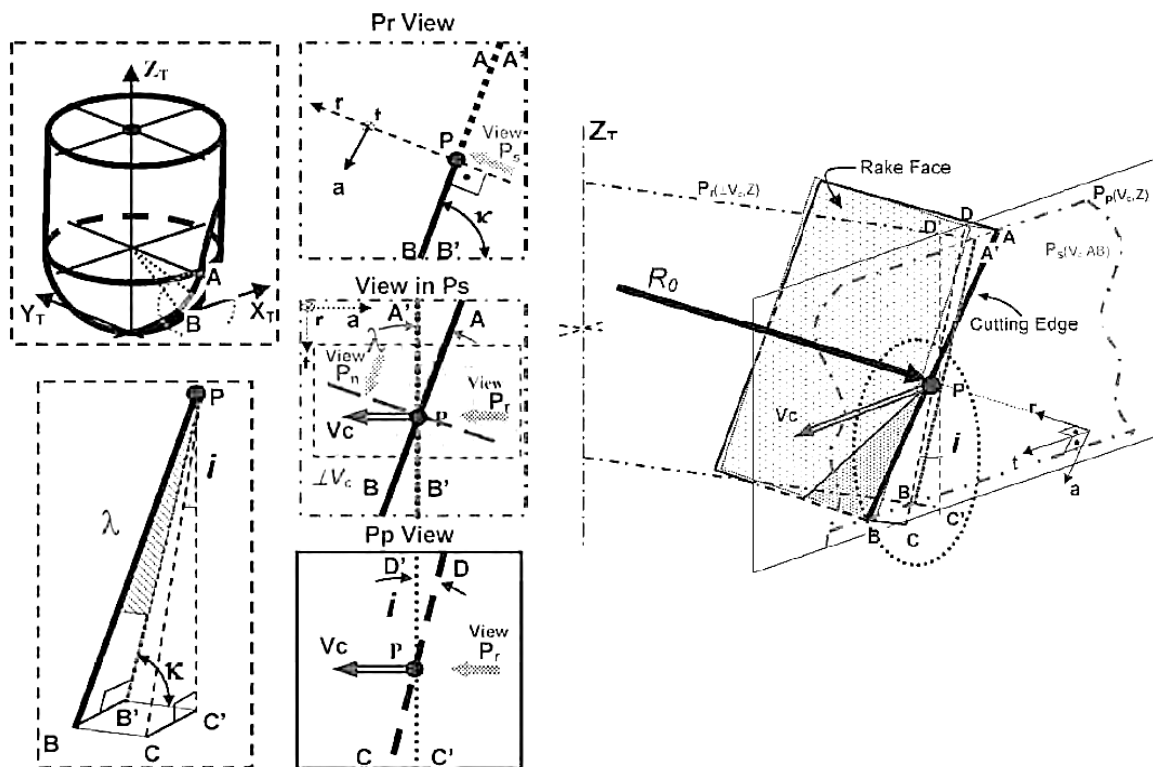


Figura 2. 16 – Geometria numa ferramenta integral de fresagem esférica: *ball nose endmill* (Lacalle *et al.*, 2011)

A representação do corte oblíquo é composto por 3 componentes em vez das duas apresentadas no corte ortogonal. A geometria e os ângulos da ferramenta definem cada componente e é adicionado o ângulo de corte característico Φ do material e o ângulo de inclinação da aresta relativo à velocidade de corte. Na Figura 2. 17 a componente das forças de corte estão descritas. No entanto o mais importante nesta representação é a avaliação quantitativa apresentada destacando, o ângulo de alívio, o ângulo de ataque e o ângulo da restas. O ângulo de ataque apresentado é positivo, sendo este o caso mais comum, apesar disto no HM é muito comum este ser definido negativamente. Nesta caso dado que o ângulo de alívio é sempre positivo, um ângulo de ataque negativo permite uma aresta muito reforçada indicada para materiais de resistência superior.

Como destacado anteriormente, uma variável geométrica muito importante é o chamado raio de preparação da aresta, diferente do raio de ponta. A definição da aresta maior e menor tem também elevada

influencia na performance da ferramenta. Por este motivo o ângulo radial e o ângulo de ataque axial em conjunto com os ângulo de alívio (folga) tem que ser cuidadosamente definido (Lacalle *et al.*, 2011).

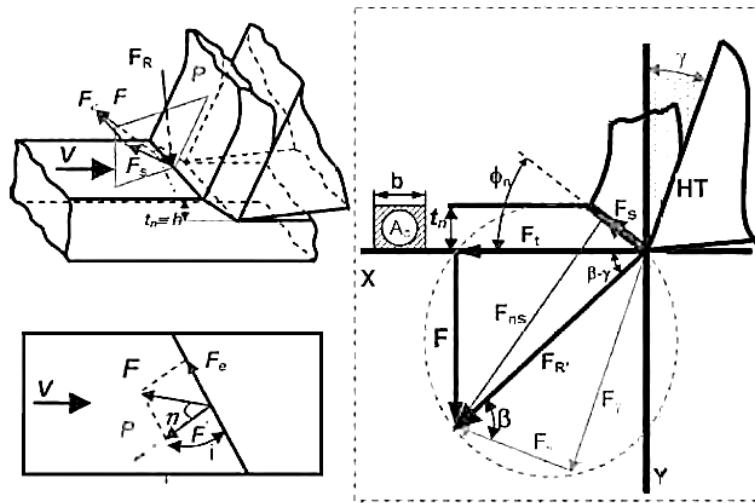


Figura 2. 17 – Representação do corte oblíquo com a decomposição das forças de corte e suas direcções (Lacalle *et al.*, 2011)

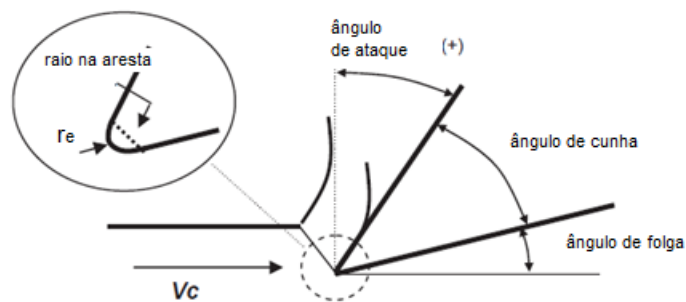


Figura 2. 18 – Ângulos base na avaliação rápida da ferramenta (Lacalle *et al.*, 2011) (Adapt.)

Nas operações de fresagem os principais parâmetros de corte são os seguintes:

- V_c – velocidade de corte (equação 2)
- f_z – Avanço por dente
- a_p , a_e , a_c – Profundidade axial e radial

Em conjunto com os diâmetros, número de arestas (z) da ferramenta, condições de entrada e estratégia de maquinagem, é possível definir os parâmetros operacionais de máquina (rotação do *spindle*, N , e avanços lineares). É possível também calcular outros valores como a secção da apara, taxa de remoção de material, etc.

$$V_c = \frac{\pi \cdot N \cdot D_c}{1000} \quad (2)$$

Onde:

N – é a rotação (rpm);

D_c – diâmetro de corte da ferramenta (mm);

V_c – velocidade de corte em (m/min).

É importante definir também o volume de material que recebe cada aresta da fresa, assim se define o avanço por dente (equação 3), sendo esta a distância que percorre cada aresta ao entrar no material.

$$V_f = f_z \cdot z \cdot N \quad (3)$$

Sendo V_f a velocidade de avanço linear (mm/min) e f_z avanço por dente (mm/z). Na Figura 2. 19 está representado o avanço por dente na fresagem concordante.

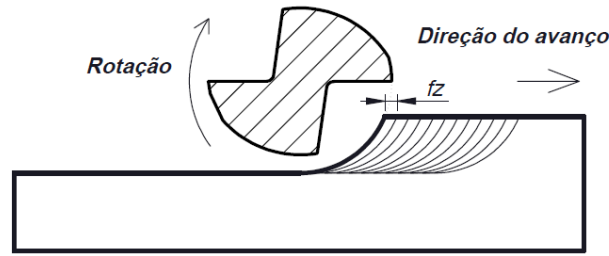


Figura 2. 19 – Representação do avanço por dente em fresagem concordante

Sonawane & Joshi, 2015 apresentam as alterações na peça não deformada na fresagem com ferramenta esférica, definindo as mudanças introduzidas pelo ângulo de inclinação da peça. Na Figura 2. 20(c) as mudanças apresentam aumento da espessura ($t_{n\delta}$) (equação 4), largura ($w_{n\delta}$), e profundidade de corte ($Z\delta$) com a variação do ângulo de inclinação da peça (δ). Desta forma segundo a representação dada no trabalho de Sonawane & Joshi, 2015 a equação modificada da espessura máxima não deformada passa a ser representada com a modificação do avanço por dente $f_{d\delta}$ e o ângulo axial ($k + \delta$).

$$t_{n\delta(0-180)} = f_{d\delta} \sin(\theta + \varphi) \sin(k + \delta) \quad (4)$$

Onde o ângulo axial k (equação 5) é obtido da geometria na Figura 2. 20 (c):

$$k = \sin^{-1} \left(\frac{R(\varphi)}{R_0} \right) \quad (5)$$

maquinagem. Neste último, que também foi realizado neste trabalho, o objectivo é avaliar a geometria específica ao longo da aresta de corte e observar as melhorias na sua microtopografia (avaliando a fragmentação ou entalhe durante os ensaios realizados) e avaliando ao mesmo tempo a adaptação da superfície das arestas de corte ao processo posterior de revestimento, tentando identificar as alterações no contacto / mecanismo de corte durante a micro fresagem das classes de metal duro.

Seguindo a definição do problema apresentado Rodríguez, 2009 afirma que para definir a correcta especificação para as ferramentas e os seus requisitos é necessário existir uma integração completa dos seguintes aspectos (ver Figura 2. 21):

- i. Peça a processar, material, forma e dimensões;
- ii. Processo de maquinagem (dinâmica, condições de corte);
- iii. Máquina (condições estáticas e rigidez dinâmica);
- iv. Envolvente (fluido de corte, condições térmicas)
- v. Ferramenta (substrato, revestimento, macro geometria, preparação de aresta).

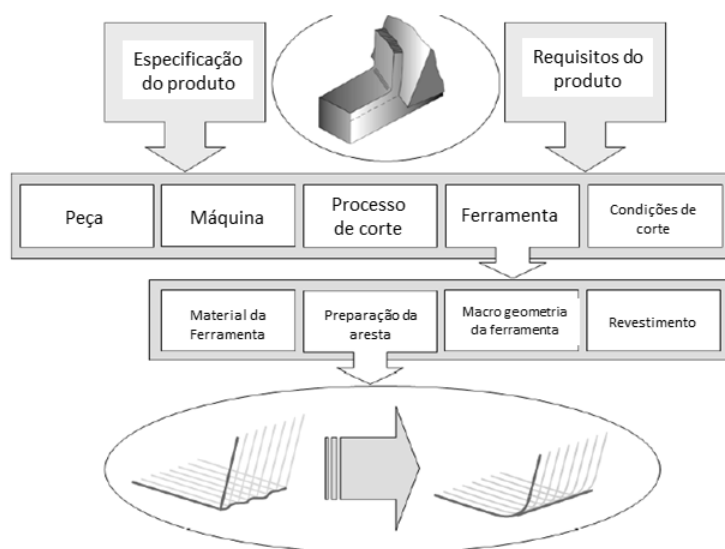
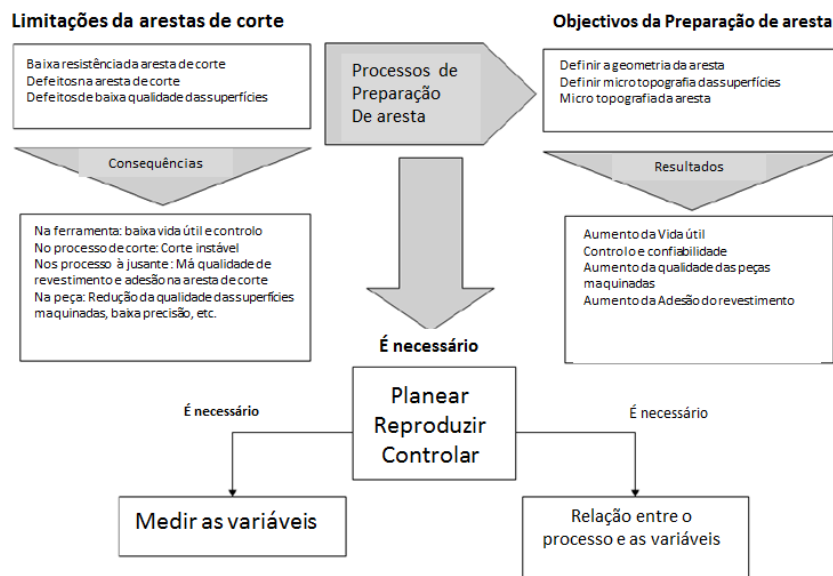


Figura 2. 21- Aspectos gerais na definição do problema da micro geometria da aresta (Rodríguez, 2009) (Adapt.)

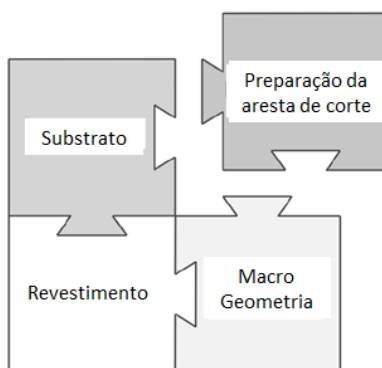
Os objectivos principais do controlo da micro preparação de aresta são:

1. Introduzir resistência nas arestas de corte;
2. Reduzir a da fragmentação da aresta;
3. Eliminar defeitos nas arestas introduzidos nas operações anteriores;
4. Aumentar a vida útil da ferramenta;
5. Preparar o substrato para os processos de revestimento;
6. Melhorar a qualidade da peça (controlo de tolerâncias, superfície e acabamento).

No trabalho desenvolvido e de acordo com Rodríguez, é muito importante avaliar os seguintes aspectos relacionados com a micro preparação de aresta, que são apresentados de forma esquemática na Figura 2. 22.



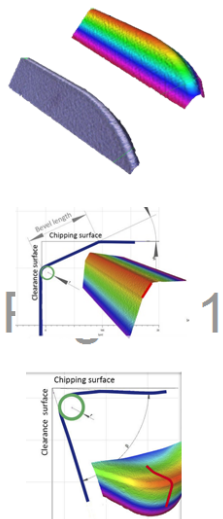
(a)



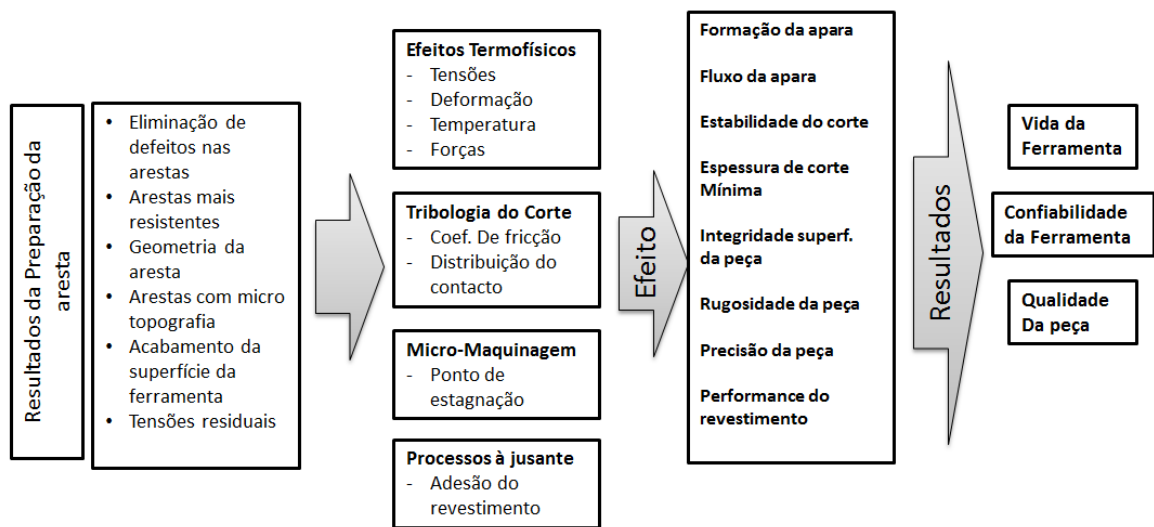
(b)

Figura 2. 22- Aspecto a considerar: (a) para uma sistemática preparação de aresta;(b) aspectos relacionado no desenvolvimento de uma nova ferramenta (Rodríguez, 2009) (Adapta.)

De forma esquemática na Figura 2. 23 estão apresentados os resultados dos trabalhos desenvolvidos por Bouzakis et al. (2014) Denkena and Biermann (2014) Rodríguez (2009) Ventura et al. (2015) Wyen et al. (2012) sendo possível, em forma de resumo apresentar os factores que influenciam a selecção e *design* da aresta de corte. Após a sua definição e processamento podemos detectar a sua influência no processo de corte.

<p>Condições Iniciais: Rebarba; defeitos na aresta; Micro fracturas; Irregularidades das superfícies</p>	<p>Geometria da Aresta de Corte</p> 		<p>Material a maquinar: Maquinabilidade</p>
			<p>Geometria da Ferramenta: ângulo de ataque; ângulos de folga; ângulo de cunha;</p>
			<p>Material da Ferramenta: Dureza; Tamanho do grão; Tenacidade; Resistência à compressão; Tensão de rutura à flexão.</p>
			<p>Revestimento: Espessura, estrutura de revestimento; Composição; Afinidade química</p>
<p>Pârametros de corte: V_c; a_p; a_e; f_n; f_z;</p>	<p>Forma e dimensão ; Micro-topografia da aresta ; Rugosidade e textura</p>		
<p>Tipo de Maquinação: Fresagem; Torneament; Furação "Hard machining"; "HSM"; Maquinação de alta precisão; Maquinação a Seco</p>			
<p>Micro Maquinação: coef. de Fricção; espessura mínima da apara</p>			

(a)



(b)

Figura 2. 23- Factores que influenciam : (a) Selecção e design da geometria da aresta de corte, (b) A preparação de aresta durante o processo de corte e seu efeito (Rodríguez, 2009) (Adapt.)

2.3. Desgaste e vida útil da ferramenta

Na operações de acabamento e semi-acabamento de materiais duros as ferramentas precisam atingir vidas úteis coerentes com esta operações, sendo normalmente longas. No entanto nestas operações os requisitos com a qualidade das superfícies são elevados e são necessárias características nas ferramenta que permitiram controlar de forma eficiente o desgaste destas (Nabhani, 2001). O desgaste das ferramentas resulta num elevado impacto no acabamento das superfícies. Por outro lado o *offset* deixado pelo desgaste das aresta origina um aumento do *stock* nas peças.

O desgaste nas das ferramentas pode ser classificado como :

1. Desgaste de adesão
2. Desgaste de abrasão
3. Difusão
4. Fadiga
5. Desgaste de delaminação

Todos estes fenómenos são normalmente combinados e os fenómenos mais relevantes dependem das condições de corte (Astakhov, 2004; Shaw e Cookson, 2005). A adicionar à classificação anterior podem ocorrer os seguintes processos: micro fragmentação, fracturas grosseiras e deformação plástica. Os modos de fractura estão relacionados com a sujeição da ferramenta a elevados esforços, operações com elevada formação de aresta postiza, baixa resistência elástica da ferramenta, ou utilização de materiais muito frágeis nas ferramentas. A deformação plástica na aresta está relacionada com as temperaturas geradas no processo e baixa resistência térmica da ferramenta.

As normas ISO 8688 são uma referência para a descrição do tipo de desgaste nas ferramentas.

De acordo com a norma ISSO 8688 o desgaste pode ocorrer em duas zonas (Figura 2. 24):

- i. Desgaste nas faces de ataque, onde normalmente é gerada uma cratera;
- ii. Desgaste nas faces de ou saída, originando desgaste de flanco, provocado pelo contacto com a superfície da peça gerada no processo de corte. Tem um aspecto típico de abrasão.

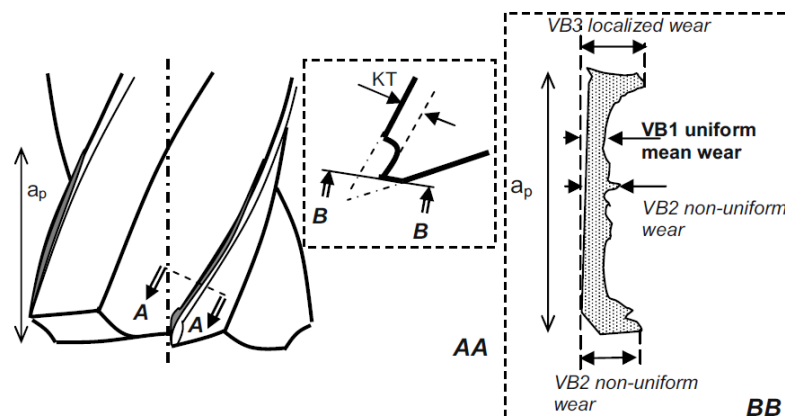


Figura 2. 24 – Caracterização do desgaste em fresas de acordo com a norma ISO 8688

Na Figura 2. 24 está representado o desgaste de flanco (*Flank Wear*) VB (Perda de material ao longo da aresta resultado da interacção entre as faces de alívio e a peça). De acordo com a referencial identificado são possíveis três tipos de desgaste de flanco:

1. Desgaste de flanco uniforme (*Uniform flank wear*) –VB1 : ao longo do sentido axial da profundidade de corte;
2. Desgaste de flanco não uniforme (*Non-uniform flank wear*) – VB2 :desgaste irregular em várias zonas da aresta
3. Desgaste de flanco localizado (*Localized flank wear*) – VB3 : desgaste apenas definido numa ponto específico, normal na zona da profundidade de corte máxima, muito comum em materiais sensíveis a encruamento.

O aparecimento do desgaste de flanco está relacionado com variações significativas das dimensões das ferramentas e por consequência do dimensional das peças. Valores de 0,3 a 0,5 mm são normalmente referência para os critérios de limite admissível em condições convencionais de fresagem em regimes de acabamento ou desbaste respectivamente. Não obstante na micro fresagem estes valores não se aplicam.

O desgaste nas faces de ataque ou cratera (*Wear on the rake face*), *KT* , normalmente está localizado no interior dos dentes das fresas, mas especificamente nas faces de ataque. É normalmente progressivo e paralelo à aresta principal de corte.

A fragmentação ou fractura (*Chipping*) (CH) é outra falha muito comum das ferramentas de fresagem, caracterizada por ser muito irregular ao longo das arestas e difícil de medir (Figura 2. 25). Caracterizado por quebra de pequenas porções da aresta é resultado do impacto mecânico e de fenómenos de fadiga térmica provocada pela corte interrompido das operações de fresagem. Nas condições tradicionais o critério recomendado pela norma define valores limites de 0,5 mm. Este tipo de falha pode ser definida em sub-grupos:

1. Fragmentação uniforme (*Uniform chipping*) CH1 – pequenas quebras e uniformes em dimensão ao longo da aresta de corte;
2. Fragmentação não uniforme (*Non-uniform chipping*) CH2 – fragmentação aleatória em alguns pontos sem qualquer padrão ao longo da aresta

Existe ainda um tipo de falha que se caracteriza por um colapso global das arestas ou ferramenta, normalmente designada de falha catastrófica.

É possível em alguns processos de fresagem, não típico na fresagem de materiais com menor resistência mecânica, existirem em simultâneo vários modos de falha e que afectam negativamente o processo de corte fazendo atingir o limite de vida útil das ferramentas.



Figura 2. 25 – Exemplo de modo de uma aresta usada na fresagem de aço ligado com fenómenos de fragmentação e desgaste de cratera (PALBIT).

2.4. Materiais das ferramentas

As solicitações simultâneas das ferramentas de fresagem obrigam a combinação específica de resistência mecânica e estabilidade térmica. As temperaturas geradas nas zonas de contacto podem atingir temperaturas valores superiores a 700°C. Adicionalmente a fricção entre os materiais (ferramenta /peça) é severa . Os resultados destes factores são: a importância que o estudo e selecção dos materiais das ferramenta adquirem como factor sucesso no *design* e utilização das ferramentas. E resumo é mandatário que:

- A ferramenta tenha um material de substrato de elevada estabilidade química, resistência física e a elevadas temperaturas;
- O material da ferramenta tem que ter baixa taxa de desgaste, tanto no mecanismo de abrasão como da adesão;
- A ferramenta deve ter elevada tenacidade permitindo reduzir a factura, e o aparecimento de fenómenos de fadiga.

Uma classificação resumida dos materiais das ferramentas divide esta enorme variedade em três grandes grupos:

1. Aços rápidos (HSS- *High speed steels*);
2. Carbonetos Sinterizados (*cemented carbides*);
3. Cerâmicos e material ultraduros, incluindo os materiais com base de alumina, *Sialons*, diamante e nitreto cúbico de boro.

Em todos estes as superfícies podem ser modificadas com introdução de revestimentos e modificação das superfícies por diversas técnicas (Bobzin, 2016; Söderberg e Sjistrand, 2001).

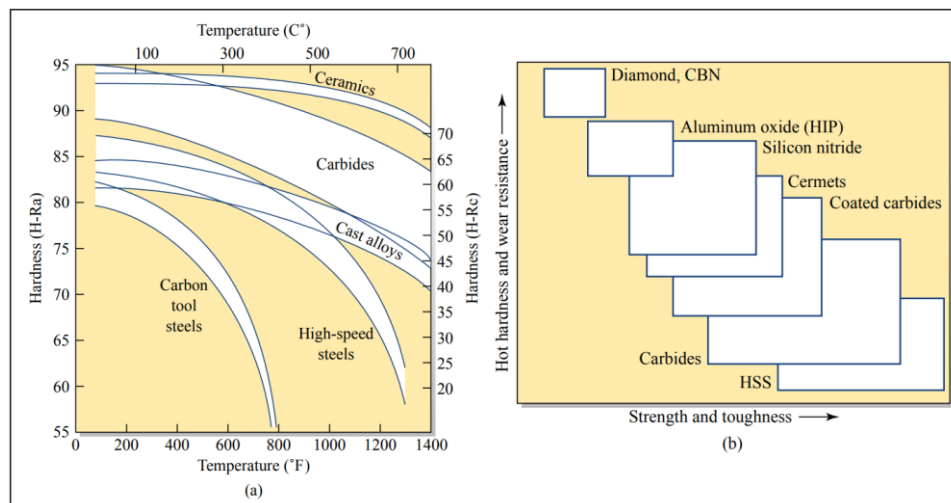


Figura 2. 26 - (a) Variação da dureza par vários materiais de ferramentas em função da temperatura. (a) Gama das propriedades nos vários grupos de materiais - (George, 2002)

2.4.1. Carbonetos Sinterizados

Estes materiais processados por pulverometalurgia utilizando materiais cerâmicos (carbonetos cerâmicos muito duros) ligados por uma fase líquida (ligante). O mais comum carboneto é o carboneto de tungstênio (WC), processado a elevadas temperaturas em combinação com pós de cobalto (Co) e quase sempre aditivado por outros elementos que melhora as propriedades e ajudam no processamento (TiC, TaC, Nb). Os dois elementos principais são balanceados (WC-Co) e controlados o tamanho das fases e grau da estrutura permitindo obter um enorme diversidade de classes (Fernandes e Senos, 2011). A correcta definição correta do tamanho dos grãos e fases na estrutura e a variação dos teores de Co permite variar a tenacidade e a dureza. Nas mais recentes inovações destacam-se a introdução de carbonetos ultra-finos, a introdução de elevados teores de crómio (Cr) e processamento de gradientes funcionais localizados de Co ao longo das estruturas.

2.4.2. Cermetos

A relevância da maquinagem a seco e a procura de ligantes alternativos deu a este grupo de materiais novos “inputs”. De princípio os cermetos têm estruturas similares aos convencionais carbonetos sinterizados. Estes materiais têm partículas muito duras ligadas por uma matriz de cobalto ou níquel. As partículas duras não incluem o WC ou (Ti, Ta, W)C mas carbonitreto à base de Ti com diferentes percentagens de Ta, de W e algum Mo. Nas estruturas mais convencionais existem combinações de TiC com formas esféricas e outros carbonetos de forma angulares de carbonetos de tungstênio. A tenacidade dos carbonetos que contêm N (azoto) é comparada com os carboneto sinterizados convencionais. A vantagem dos cermetos é a grande dureza a elevada temperatura (e velocidades de corte), conseguindo também uma estabilidade química alta permitindo boas superfícies maquinadas. No geral, os cermetos têm menor tenacidade que os carbonetos de base WC. Por esse motivo apresentam algumas limitações quando sujeitos a processos de corte menos estáveis. Estas características promovem uma maior fragilidade e ficam num campo de aplicação entre os materiais cerâmicos e os carbonetos cementados (Tönshoff, Wobker e Cassel, 1994).

2.4.3. Cerâmicos

Nas ferramentas de corte existem dois grandes grupos de materiais cerâmicos tendo em conta o material de base. Os óxidos de alumina, mais conhecidos por aluminas, têm ligações atômica e interatômicas muito fortes que transformam este materiais em estruturas de características muito definidas. Podem ser processados em fases cristalinas muito diferentes, transformando-se quase sempre nas estrutura hexagonal alfa a elevadas temperaturas. Existem algumas estruturas que fazem combinar os óxidos de alumina com materiais duros (carbonetos), permitindo alterar as características mecânicas (Brandt, 1999; Senthil Kumar, Raja Durai e Sornakumar, 2006).

O outro grupo de materiais cerâmicos são os nitretos de silício. Estes materiais têm boas características a elevada temperatura e um coeficiente expansão térmica baixa em comparação com os outros materiais cerâmicos (Lee, 2000).

A produção dos cerâmicos é feita através de três diferentes técnicas: *Reaction Bonded Silicon Nitride* (RBSN), *Hot Pressed Silicon Nitride* (HPSN) e *Sintered Silicon Nitride* (SSN)

Os cerâmicos compósitos com SiC-*Whisker* são uma inovação com grande potencial pois permitem melhoras as propriedades mecânicas dos cerâmicos. Estas “*wiskers*”(fibras) têm a capacidade de aumentar a tenacidade e condutividade.

2.4.4. Nitretos de Boro

Existem várias estruturas de nitreto de boro. A mais aplicada é o nitreto de boro cúbico (CBN) que é muito dura e de elevada resistência à abrasão tendo grande aplicação nas ferramentas de corte. O CBN tem uma estrutura similar ao diamante. Esta classe de material é a segunda mais dura e é composta por cristais de CBN ligados por um ligante, permitindo obter elevadas durezas e menor desgaste a elevadas temperaturas (superiores a 1400°C) (Mamalis, Kundrák e Horváth, 2002).

2.4.5. Diamante

O diamante monocristalino (*monocrystalline diamond* – MCD) é o material mais duro utilizado nas ferramentas. As estruturas policristalinas de diamante (*polycrystalline diamond* - PCD) permitem elevada tenacidade em comparação com o MCD. Estes materiais permitem uma combinação ótima de estabilidade química, física e mecânica, com baixo coeficiente de fricção e expansão térmica e resistência à química à corrosão. No entanto existem algumas desvantagens relacionadas com estados meta-estáveis a temperaturas baixas permitindo ligações com o oxigénio a temperaturas superiores a 600°C. Por este motivo são mais aplicados na maquinaria de materiais não ferrosos.

2.4.6. Revestimentos de diamante HFCVD

A utilização de revestimento pode potenciar as propriedades tribológicas das ferramentas e por consequência a vida útil das mesmas. A optimização das propriedades permitem a aplicação eficiente nas ferramentas de maquinaria e é generalizada na sua maioria, sendo muitas vezes possível na actualidade a utilização eficiente das ferramentas sem a introdução de revestimentos. As combinações mais comuns nas multicamadas dos revestimento incluem actualmente TiN, Al₂O₃, TiC, TiCN, AlTiN, ZrN, TiB₂, DLC (*diamond-like carbon*), CBN e diamante. As protecções processadas pela deposição dos revestimentos resultam sempre de camadas nano-estruturadas combinando por exemplo: (Ti,Si)N, (Ti,Si,Al)N, Cr/TiN, (Ti/W)N (Matthews, 2001). O ajuste dos elementos tem em consideração diferentes estruturas cristalinas (tipo e tamanho), *interfaces*, espessura, tipo de superfícies tendo desta forma uma enorme variedade de propriedades.

Nos dias de hoje os processos de revestimento são essenciais, 90% das classes de metal duro (WC-Co) são utilizadas em combinação com estruturas de revestimento, processadas por CVD (*chemical vapour deposition*) ou PVD (*physical vapour deposition*).

Genericamente os revestimento servem para conseguir reduzir o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material a maquinar, diminuir a tensões térmicas, aumentar a dureza e condutividade térmica, conferir isolamento térmico do substrato e aumentar a estabilidade química.

A utilização de estruturas de diamante em revestimentos policristalinos, em especial processadas por CVD, promovem a redução da resistência mecânica em comparação com os mono-cristais de diamante. No entanto é possível aumentar a tenacidade como pode ser visualidade na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1– Propriedade gerais das estrutura de diamante e CBN (Almeida, 2007a) (Adapt.)

Propriedade mecânicas	Mono-Cristal	CVD – Diamante	CBN
Dureza (GPa)	50-100	75-100	40-60
Coefficiente de atrito sobre o aço a seco	-	-	0,4
Coefficiente de fricção sobre AlSi7CuMg	-	0,1	-
Máx. Temperatura de Trabalho (°C)	600	600	1200
Tenacidade à Fractura (MPa.m ^{1/2})	3,4	5,5-8,5	5
Módulo de Young (GPa)	1000-1100	1000-1100	500-800
Tensão de Rutura (GPa)	1050-3000	900-1300	-
Tensão de Rutura transversar (GPa)	2,9	1,3	-
Tensão de compressão (GPa)	9	9	

Quimicamente inerte, o diamante não reage com ácidos. Contudo, a altas temperaturas o diamante pode reagir com metais como tungsténio, titânio, tântalo ou zircónio, formando carbonetos. Outros metais como o ferro, cobalto, níquel e crómio podem dissolver o diamante a partir de temperaturas de 600°C.

O diamante puro é composto unicamente pelo elemento carbono. Pode ter a configuração electrónica ns² np², as orbitais podem formar orbitais híbridas tetraédricas sp³, originando sólidos que cristalizam na chamada estrutura do diamante. É possível visualizar esta estrutura (Figura 2. 27) como sendo formada por duas redes cúbicas de faces centradas (fcc), separadas ao longo da diagonal da célula cúbica (Neto, 2007).

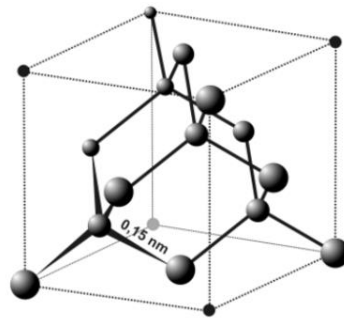


Figura 2. 27 – Estrutura unitária da rede do diamante (Neto, 2007)

Actualmente os revestimento de diamante CVD são cada vez mais utilizados na maquinagem de materiais muito duros e abrasivos, como são os casos das fibras de carbono reforçadas (CFRC's), materiais cerâmicos e carbonetos sinterizados e nos processos de maquinagem de ligas de alumínio, em especial quando os teores de Si são elevados, grafites, ligas de cobre, algumas aplicações de fresagem de ferros fundidos (Bobzin, 2016).

O processo de revestimento e a deposição de diamante são actualmente feito por diversos métodos: deposição por filamento quente - HFCVD (*Hot-filament Chemical Vapor Deposition*), deposição por plasma de micro-ondas ou MPCVD (*Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition*), MWCVD (*Micro-Wave Chemical Vapour Deposition*), PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*). Os dois primeiros métodos caracterizam-se por conseguirem depositar filmes espessos com elevado controlo.

No processo HFCVD o crescimento é efectuado em presença de hidrogénio de forma a facilitar a erosão selectiva da grafite pelo hidrogénio atómico. Durante a activação das espécies contendo carbono (ex: CH₄) são submetidos a uma activação térmica (num filamento quente) sendo possível processar as espécies responsáveis pela nucleação e crescimento do diamante (Figura 2. 28). O crescimento é realizado a temperatura relativamente baixa do substrato entre 500°C e 1000°C.

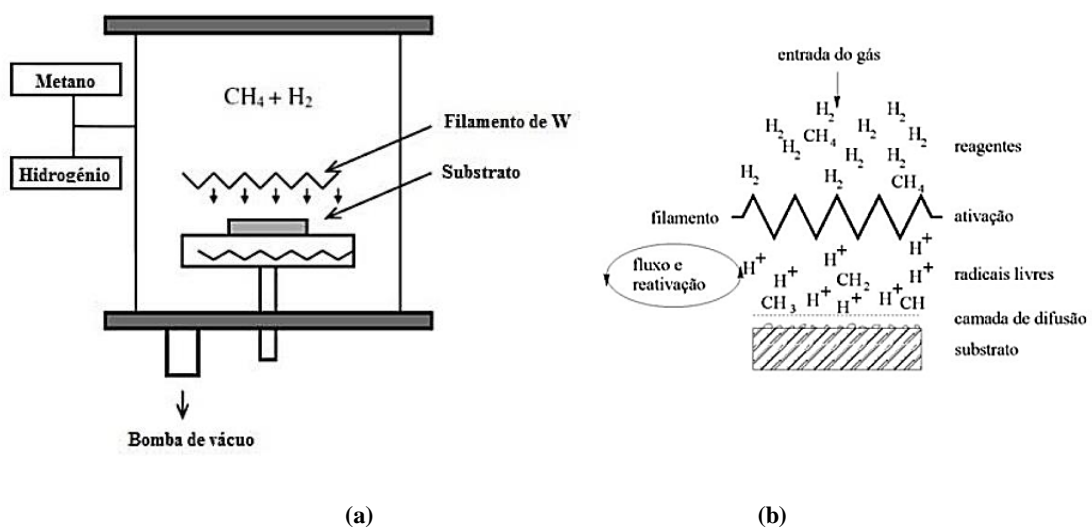


Figura 2. 28 - Representação esquemática no HFCVD: (a) de um reator ; (b) do método de activação e deposição (Spear e Dismukes, 1994)

No HFCVD a dimensão dos cristais de diamante nos filmes produzidos pode ser alterado. Estes podem ser microcristalinos (MCD) ou nanocristalinos (NCD), esta variação dos parâmetros de deposição permite gerar diferentes mecanismos de crescimento da microestrutura: a colunar, em que os cristais crescem a partir da primeira camada depositada e a equiaxial, caracterizado por cristais pequenos que crescem aleatoriamente. No NCD onde o crescimento equiaxial é característico, sendo originado pelo aumento da nucleação secundária conseguida através do aumento muito controlado (devido à formação de grafite), da razão de gases CH₄/H₂, sob a aplicação de uma corrente de polarização ou usando árgon para facilitar os processos de renucleação (Almeida 2007b; Duarte 2013). O crescimento a partir da camada depositada origina um filme de diamante microcristalino (MCD) enquanto que o crescimento equiaxial dá origem a um filme de diamante nanocristalino (NCD). No filmes NCD existe uma superfície de menor rugosidade (em comparação com o MCD, (Figura 2. 29), mas a sua dureza é inferior devido à presença de carbono sp² na estrutura (Almeida, 2007, 2007; Belmonte *et al.*, 2003; Pires, 2011; Pratas, 2015; Uddin *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2001).

O desempenho do revestimento está dependente da capacidade do material garantir dureza elevada, da boa adesão ao filme, da elevada tensão de elástica/ruptura e da baixa expansão térmica (reduzir as tensões na interface). É necessário ter em consideração algumas características do processo de maquinagem na definição do material da ferramenta tais como os tipos de materiais a maquinar e condições e estabilidade do processo, a temperatura, os parâmetros de corte e a tensão aplicada.

O cobalto presente no metal duro dificulta a adesão do diamante ao substrato. A sua existência promove a formação de grafite, catalisando as ligações sp² em detrimento das ligações sp³, características do diamante, enfraquecendo assim a adesão do filme à ferramenta. Se o Co estiver presente em maior quantidade menor será adesão do filme de diamante. A difusividade e solubilidade do carbono no cobalto atrasam a nucleação do diamante. Também o estado de acabamento das superfícies a revestir contribui para a adesão do filme de diamante, para o aumento da rugosidade superficial do substrato e parar o aumento da força de adesão do filme devido à ancoragem mecânica (Manaud *et al.*, 2007).

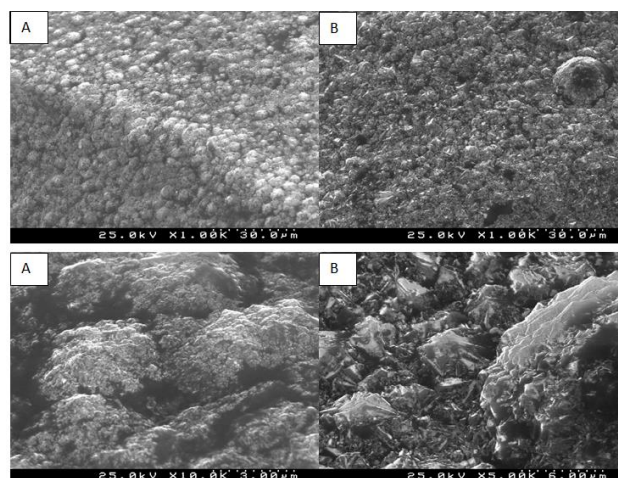


Figura 2. 29 - Detalhe do diamante na superfície das ferramentas testadas em ensaios iniciais (PALBIT) : NCD em (A) e MCD em (B). Em B há aglomerados na superfície com cerca de 15-30 µm de diâmetro.

As ferramentas revestidas a HFCVD utilizadas para micro fresagem de materiais duros chegam ao final da sua vida útil normalmente através da delaminação do filme da aresta principal de corte. Este desprendimento causa a exposição do substrato da ferramenta e consequente aumento de forças, temperaturas e mecanismos de desgaste.

2.5. Metal duro

As classes de metal duro, são um materiais compósito que se inserem na classes carbonetos sinterizado com já foi descrito anteriormente. Nestas, o WC é a matriz e o Co, Ni ou outros são o ligante metálico. Muitas vezes são introduzidos outros elementos na estruturas para melhorar as propriedades ou para permitir o processamento. Este material é processado seguindo o ciclo da pulverómetalurgia, após a mistura dos elementos que o compõem, é submetido a uma moagem e alguns processo para controlo do tamanho de particular (atomização / granulação). Em seguida os pós das classes são conformados e por último são densificados por sinterização. As principais técnicas para densificar o metal duro são a sinterização em vácuo com fase líquida auxiliadas quase sempre por prensagem isostática a quente (*HIP- Hot Isostatic Pressing*).

Por balanceamento de cada um dos elementos que compõem as classe de metal duro consegue obter-se uma grande diversidade de propriedades metalúrgicas, físicas e químicas. As propriedade podem ser também alteradas sem existir alteração no balanceamento dos materiais apenas modificando características microestruturais, tal como o tamanho médio de grão, que pode variar entre 0,3 μm até 30 μm (Figura 2. 30) para além da distribuição das várias fases na estrutura.

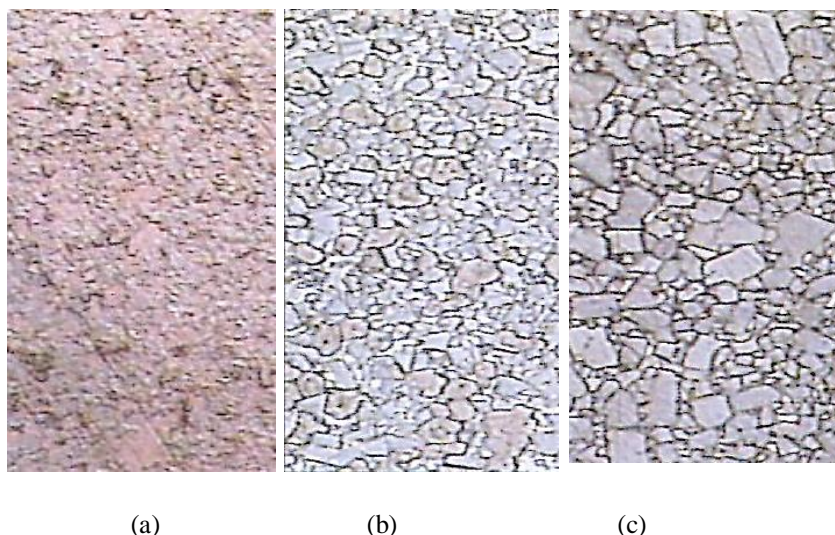


Figura 2. 30- Microscopias ópticas (1500x) de classes de metal duro da Palbit: (a)ternária, submicrométrica WC com 0,5 μm ; (b) Ternária, WC com 3 μm ; (c) Binária WC com 6 μm

2.5.1. Estruturas de Metal duro e Aplicações

Nas diversas aplicações (Figura 2. 31) as características do WC conferem-lhe óptimo compromisso entre tenacidade e dureza, com elevada resistência ao desgaste. A célula unitária do WC tem estrutura hexagonal, onde os átomos de W ocupam as posições exteriores dos hexágonos e os átomos de C ocupam as posições interiores. A estrutura cristalina hexagonal simples é estável até 2750 °C em atmosferas inertes. No entanto, a célula unitária de C é assimétrica e introduz anisotropia à estrutura e a sua dureza depende da orientação dos cristais. O ligante, normalmente o Co tem duas principais funções: ajudar na densificação, operando como fase líquida durante o processo de sinterização, acima de cerca de 1350 °C e confere tenacidade ao metal duro. O Co tem uma temperatura de fusão de 1495 °C e uma densidade de 8,90 g.cm-3 e apresenta uma excelente molhabilidade com os grãos de WC, característica fundamental para a utilização deste metal como ligante. A quantidade de Co no metal duro varia geralmente entre 3-12% (em peso) para aplicações em ferramentas de corte, mas pode atingir percentagens até 30% para aplicações especiais que requerem maior tenacidade. Na Figura 2. 31 são apresentadas algumas características do metal duro em função da quantidade de ligante e do tamanho médio de grão. O Ni é também usado como ligante metálico em substituição do Co. O Ni usa-se quando a resistência à corrosão é um requisito da peça final. Outros elementos como o carboneto de vanádio (VC), carboneto de crómio (Cr₂C₃), o carboneto de titânio (TiC), o carboneto de tântalo (TaC) e o carboneto de nióbio (NbC) são também constituintes do metal duro e servem, por exemplo, para controlar o tamanho de grão ou melhorar a dureza a quente.

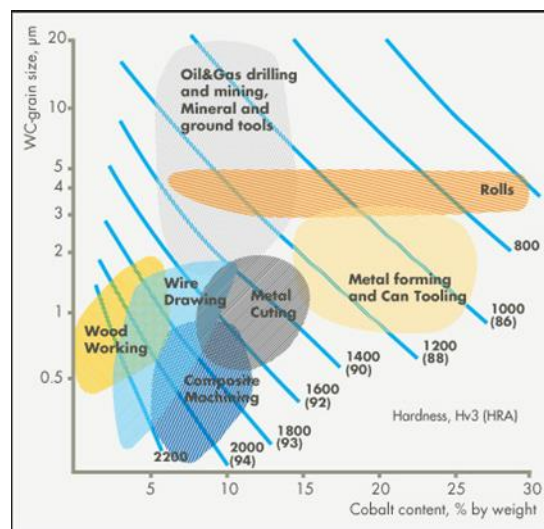


Figura 2. 31 – Aplicação e gama de durezas para diferentes classes de metal duro com diferentes composições de Co e tamanho de grãos de WC (Sarin, 2014)

2.6. Síntese

Como apresentado é possível confirmar que grande parte das abordagens de fresagem convencional e em materiais convencionais não tem uma aplicação directa para a microescala e em materiais de elevada dureza. Em relação ao corte e remoção de material, as interações entre a ferramenta e o material fresado

apresentam um comportamento distinto, devido aos efeitos de deformação quando são fresadas espessuras finas. Além disso, para as aparas reduzidas e espessura de corte pequenas em materiais duros, o processo de corte pode torna-se instável. Quando a profundidade de corte não atinge um valor mínimo, a apara não se forma, podendo existir deformação sem a remoção de material. Assim, que a espessura de corte se aproxima da espessura mínima, o material começa a ser removido. A espessura mínima está relacionada com o raio da aresta de corte, além das características do material que se deseja maquinar. Nas condições da micro maquinagem são destacados os fenómenos da mínima espessura de corte, energia específica de corte, modelo de maquinagem dúctil e geração da superfície e rebarbas.

Fica evidenciada a importância da definição e preparação da aresta de corte onde a correcta definição está dependente de um sistema de variáveis e o resultado resulta desta especificação e processo.

As potencialidades do processamento de revestimentos nano-estruturados em particular do HF-CVD, é apresentado. No entanto as variáveis do seu processamento e da sua definição final necessita de um estudo profundo tendo em atenção a triangulação do processo, ferramenta e material a maquinar.


Neste trabalho e com o objectivo de descrever o processo de corte na micro fresagem em materiais duros com ferramentas diamantadas é apresentado nos capítulos seguinte o comportamento de um material ultra duro (classe de metal duro – WC-co) e a formação da apara em função das condições de corte e ferramenta. É também apresentada a resposta de várias estruturas de revestimento HF-CVD utilizando uma ferramenta de micro fresagem esférica durante o corte de duas classes de metal duro diferentes.

3. Materiais e métodos

3.1. Classe de metal duro a maquinar e utilizada nas ferramentas

A classe de metal duro utilizada para produção das ferramentas utilizadas nos estudos e ensaios foi fornecida pela empresa PABIT, a sua escolha seguiu a recomendação da empresa resultando de ensaios preliminares onde foi avaliada a adesão dos filmes de diamante na micro-fresagem de metal duro com revestimento de diamante com estruturas MCD e espessuras inferiores a 10 µm (Tabela 3.1).



Tabela 3. 1 -Propriedades da classe de metal duro utilizada nas ferramentas de micro-fresagem (PALBIT)

Propriedades	
	CLASSE
Dureza (HV10)	1600
TRS(B) (N/mm2)	4000
Tamanho Grão (ASTM)	Micro Grão
%Co (peso)	6
%γ (TaC+NbC+TiC)	1
WC (µm – FSSS utilizada na mistura)	0,6
ISO	K10

Para o estudo da maquinabilidade e comportamento das ferramentas foram utilizadas mais duas classes de metal duro fornecidas para PALBIT as características das diferentes amostras são apresentadas na Tabela 3.1.**Erro! A origem da referência não foi encontrada..** Estas duas classes foram escolhidas para onseguir identificar as diferenças entre duas estruturas de metal duro com tamanhos de grão diferentes e valores de dureza distintos, por outro lado são classes com grande aplicação no fabrico de peças para a produção de punções, matrizes e peças do aplicação no sector do “anti-desgaste” em geral.

As amostras/substratos foram produzidos com recurso a prensagem uniaxial e sinterização a vácuo assistida com “pressão” (SINTERHIP).

Tabela 3. 2- Propriedades das classe de metal duro maquinadas durante os ensaios (PALBIT)

Propriedades		
	CLASSE A	CLASSE B
Dureza (HV10)	1160± 40	1585 ± 45
TRS(B) (N/mm2)	3270	3400
K_{IC} (MPa.m^{1/2})	≥20	11,3±1,1
Tamanho Grão (ASTM)	Médio-Grosso	Micro Grão
%Co (peso)	15	10
%γ (TaC+NbC+TiC)	0,5-1,5	1,0-2,0
WC (μm – FSSS utilizada na mistura)	3,0	0,8
ISO	K45-K55	K20 – K30

3.2. Geometria da Ferramenta

Para o processamento dos ensaios foi utilizada uma definição geométrica da empresa PALBIT adaptada à micro fresagem de materiais duros e produzida pela empresa para os ensaios (Figura 3.1). As ferramentas foram avaliadas cuidadosamente do ponto de vista da macro geometria e também da micro definição da aresta (apresentado no ponto 3.3.). Na Tabela 3.3 estão definidas as macro definições geométrica das ferramentas utilizadas.

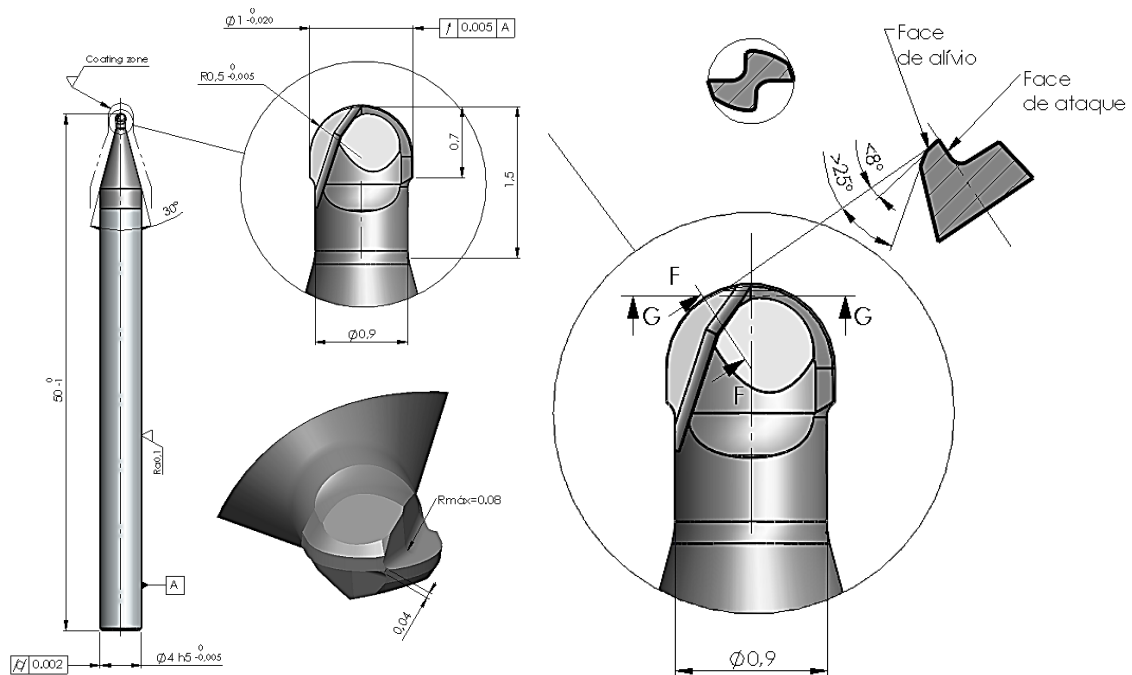


Figura 3. 1 – Definição geométrica estudada e definida para os ensaios deste trabalho (PALBIT)

Tabela 3. 3– Definições geométricas macro das ferramentas (PALBIT)

Dc [mm]	1,00
D1 (encabadouro) [mm]	4
Altura útil de trabalho [mm]	1,5
γ_n (ângulo de ataque)	0°
λ_s (ângulo de inclinação da restas)	0°
α_n : ângulo de saída	6-8°

3.3. Preparação superfície e aresta

Na micro fresagem algumas condições de corte (em particular a profundidade e largura de corte) têm quase a mesma amplitude do raio nas arestas, nestas condições existem alterações do ângulo de corte efectivo podendo tornar-se extremamente negativo. O efeito de escala na micro fresagem resulta em situações instáveis de espessuras de aparas não cortadas pelo raio nas arestas, tornando-se muitas vezes o factor dominante na mecânica do corte e geração das aparas. Por este motivo a definição e avaliação das condições da aresta de corte estão apresentadas na Tabela 3. 54.

Na preparação das ferramentas de forma controlada através de jateamento de meio húmido (Figura 3. 2) realizou-se de forma sistemática a preparação das arestas de corte com o objectivo de adicionar resistência à aresta, minimizar o destacamento de lascas, eliminar os defeitos das etapas de rectificação, preparar a superfície para o revestimento. Este processo provoca também uma redução do conteúdo de Co na superfície. Em todas as ferramentas excepto nas utilizadas para o ensaio de vida útil onde o objectivo era avaliar o efeito do processo preparação de superfície foi utilizada a condição 1 (Tabela 3. 45).

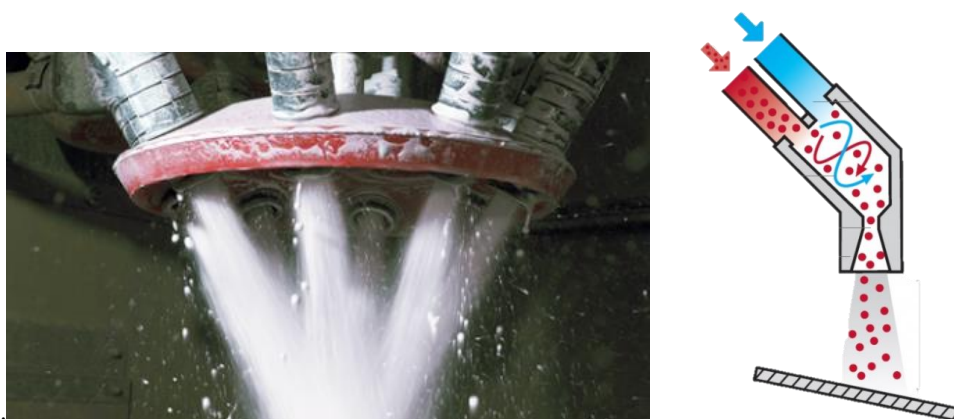
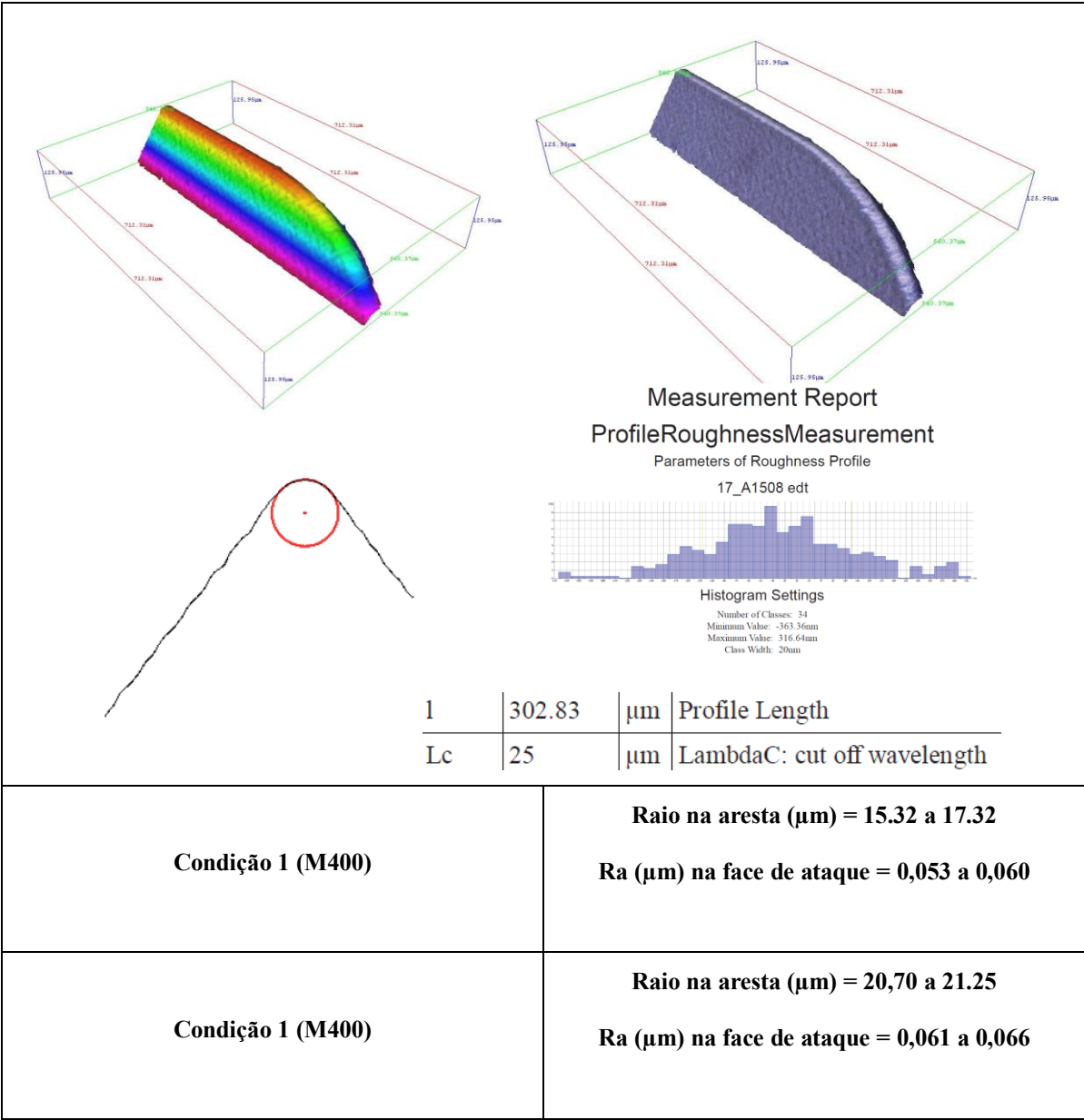


Figura 3. 2– Representação do processo utilizado para preparação de arestas e superfícies – jateamento em meio húmido (PALBIT)

Tabela 3. 4- Condições de jateamento em meio húmido utilizadas

Condição 1 (M400)	<p>Abrasivo - $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$; Mesh 400 ($d_{50} = 22 \mu\text{m}$)</p> <p>$P=1.2 \text{ bar}$</p> <p>ângulo do nozzles= 45° velocidade linear da mesa (mm/s) = 45</p>
<p>Condição 2 (M320)</p> <p>Condição apenas utilizada no ensaio de vida útil para avaliação das condições de jateamento em meio húmido</p>	<p>Abrasivo - $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$; Mesh 320 ($d_{50} = 37 \mu\text{m}$)</p> <p>$P=1.8 \text{ bar}$</p> <p>ângulo do nozzles= 45° velocidade linear da mesa (mm/s) = 45</p>

Tabela 3. 5- Condições da aresta de corte e superfícies nas ferramentas após revestimento



3.4. Deposição de filmes de diamante HFCVD

Após a rectificação e preparação das arestas e superfícies das ferramentas, procedeu-se à deposição dos filmes de diamante. A técnica usada foi a deposição química em fase vapor assistida por filamento quente (HFCVD). O reactor utilizado neste trabalho foi o equipamento de ensaios da Cemecon CC800/DIA5 (Figura 3. 13). Os valores dos diversos parâmetros usados para a carburização e para a deposição dos diversos revestimentos de diamante seguiu parâmetros pré-definidos pela PALBIT. Todas condições como o número de filamentos, a pressão, o fluxo e razão de gases, a temperatura de filamento e de substrato foram variadas

até se atingirem as condições consideradas ideais para revestir as fresas dos ensaios, estes parâmetros e variáveis de deposição foram avaliados cuidadosamente pela empresa Palbit e Cemecon por forma a estruturar as combinações estudadas e caracterizadas no ponto 4.1.



Figura 3. 3- Equipamento de ensaios da Cemecon CC800/DIA5 utilizado para processar os revestimento de diamante HFCVD

3.6 Centro de maquinagem CNC, fixação e suportes

Um dos requisitos da micro fresagem é a necessidade de utilizar centros de maquinagem com elevada precisão e sem introdução de vibrações, por outro lado é crítica a fixação da peça. A micro fresagem necessita de máquinas com capacidade de operar a alta rotação e precisão que só é possível com utilização de sistema de acoplagem das ferramentas coerentes com os requisitos.

Os *spindles* têm tido uma evolução tecnológica nos últimos anos, no mercado na aplicação estudada as máquinas têm sistemas complexos de ligação motores com sistemas hidrostáticos e controlo de lubrificação muito evoluídos.

Os porta ferramentas HSK são quase sempre utilizados porque são capazes de operar a elevada rotação aumentando o contacto com o *spindle* ao aumentando a rotação. Neste sistema de fixação o mecanismo de tirante central que se expande no interior do porta ferramenta permite uma fixação rígida do porta ferramenta mesmo com o efeito das elevadas forças centrífugas geradas pela elevada rotação. A precisão é também característica deste tipo de fixação onde é possível obter batimentos axiais e radiais menores que 1µm.

Para os ensaios de maquinagem foi utilizado o centro de fresagem CNC, MAKINO IQ300 (Figura 3. 4), máquina construída e dedicada para micro fresagem, capaz de operar em condições “sub-micro” e repetibilidade de “nano escala”. Tem motores lineares com uma escala de 0,005 μm e controlo interno e estrutural da temperatura (Tabela 3. 6).



Figura 3. 4– Imagem do centro de fresagem CNC – MAKINO IQ300 (PALBIT)

Tabela 3. 6 – Características do centro de fresagem CNC utilizado no ensaio – Makino IQ300

Tamanho da mesa (mm)	500 x 400
Curso X (mm)	400
Curso Y (mm)	350
Curso Z (mm)	200
Spindle RPM	45.000
Fixação do spindle	HSK-E32
Motores Lineares	(X-, Y- & Z)
Escala das réguas de controlo (μm)	0,005
Menor incremento possível (mm)	0.0001
Controlo de ferramentas	Sistema automático de medição óptica da geometria da ferramenta

Após a colocação da ferramenta foi sempre feita a medição da mesma controlando os valores do comprimento e batimento radial e axial, este procedimento permitiu reduzir a valores muito pequenos (erros menores que 0,002mm) a imprecisão da fixação da ferramenta e conjunto, ferramenta / porta ferramenta (Figura 3. 5) .

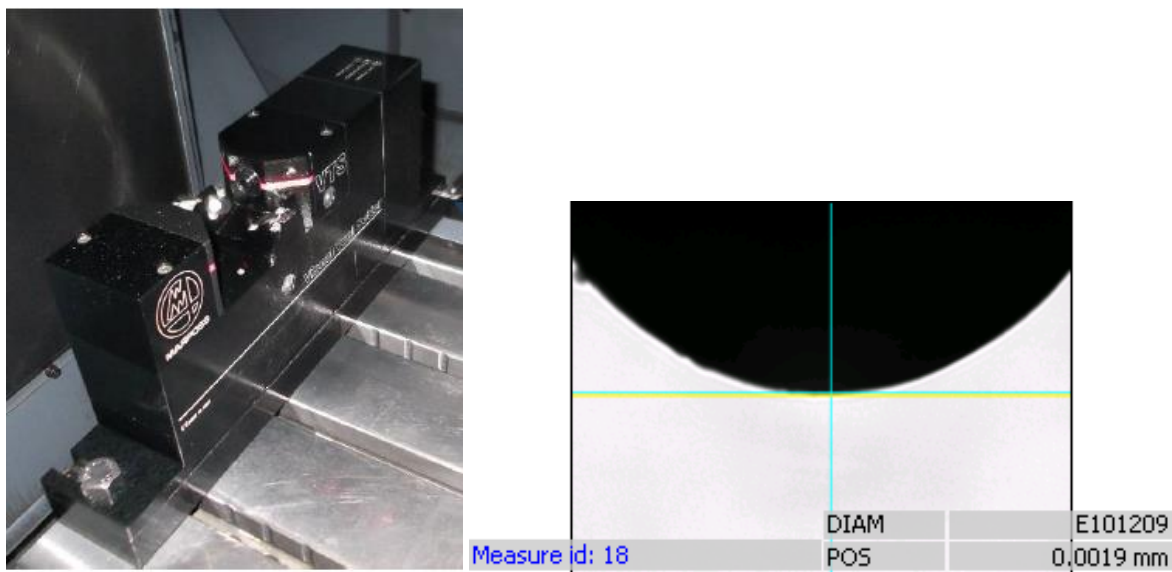


Figura 3. 5 – Sistema de medição. exemplo da imagem obtida durante a medição da ferramenta utilizando o sistema de medição óptico interno da máquina IQ300

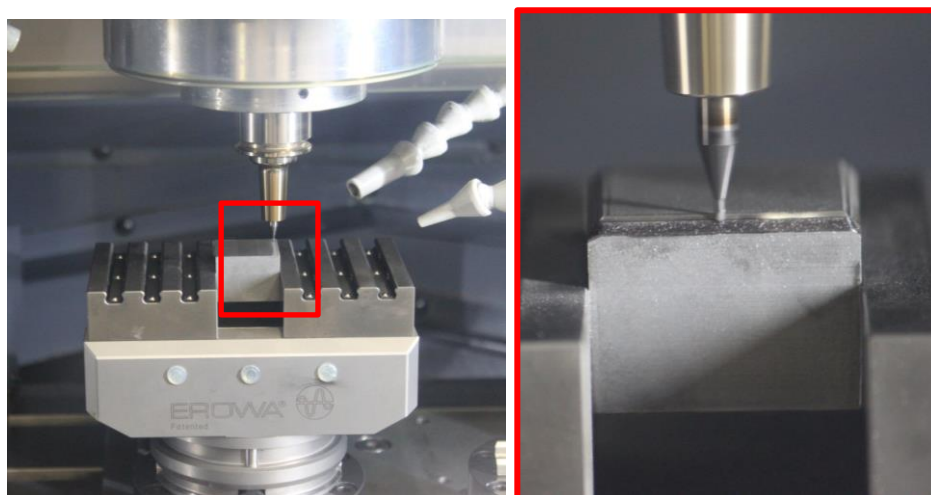


Figura 3. 6– Imagem da montagem utilizada para fixação dos corpo de prova no ensaios de maquinagem

3.7. Ensaios de vida útil na micro-fresagem

Alguns factores podem indicar a necessidade de substituição da ferramenta, como um desgaste excessivo da superfície de saída podendo levar à falha da aresta de corte, o acabamento superficial

insatisfatório da peça entre outros. A vida da ferramenta é geralmente expressa em minutos, mas também pode ser medida como o percurso de corte ou percurso de avanço correspondente.

Nos ensaios realizado o controlo de vida útil evolução do desgaste e falha da ferramenta foi realizado definindo paragem periódicas para medição do desgaste (por medição do desgaste de flanco VB) e

observação dos modos de falha da ferramenta. A medição realizada utilizou um equipamento multi-sensor para inspeção e medição (Micro-Vu Vertex 311- Figura 3. 7). Em contínuo e também foi monitorizada força no “*spindle*” eixos com o sistema integrado no contro de maquinaria Makino IQ300.



Figura 3. 7– Imagem do equipamento e exemplo do controlo visual feito nas ferramentas durante o ensaio - Micro-Vu Vertex 311 (Resolução -0,1 μ m) (PALBIT)

3.8. Medição da rugosidade

A rugosidade superficial é um indicador usado na avaliação da qualidade do produto, podendo também ser um requisito que pode ter seu desempenho influenciado pelas características de suas superfícies. Existem várias normas ISO (ISO 13565-2; ISO 4287; ISO 12085) que apresenta diversas definições e parâmetros que devem ser utilizados para caracterização do estado de acabamento das superfícies e perfis superficiais (rugosidade, ondulação e perfil primário).

No ensaios para avaliação da rugosidade e a aresta das ferramentas foi utilizada uma ferramenta ótica da medição 3D - *Alicona Infinitefocus G5* (Figura 3. 8), permitindo a medição de superfície de forma automática. Este dispositivo combina as características de um dispositivo de medição de superfície e uma tecnologia de medição de coordenadas. O equipamento recolhe imagens em 3D geradas pelo armazenamento e processamento de inúmeras fotos que são tiradas da peça em diferentes profundidades de foco. Desta forma, o equipamento varia a focagem desde o ponto mais alto da peça até o ponto mais baixo, o software consegue gerar a geometria da superfície camada por camada. Com o auxílio de um software de análise de perfis e rugosidades, é possível extrair o perfil de uma determinada região da peça, executar medições como ângulos, distâncias e parâmetros de rugosidade (Anexo 1- Figura A. 2).

Após o revestimento as ferramentas foram observadas e inspeccionadas num microscópio ótico e avaliada as condições da arestas com micro topografia óptica (*Alicona InfiniteFocus*), antes de qualquer tratamento e após revestimento. As imagens serviram para ver o estado das arestas de corte, bem como as superfícies das mesmas.

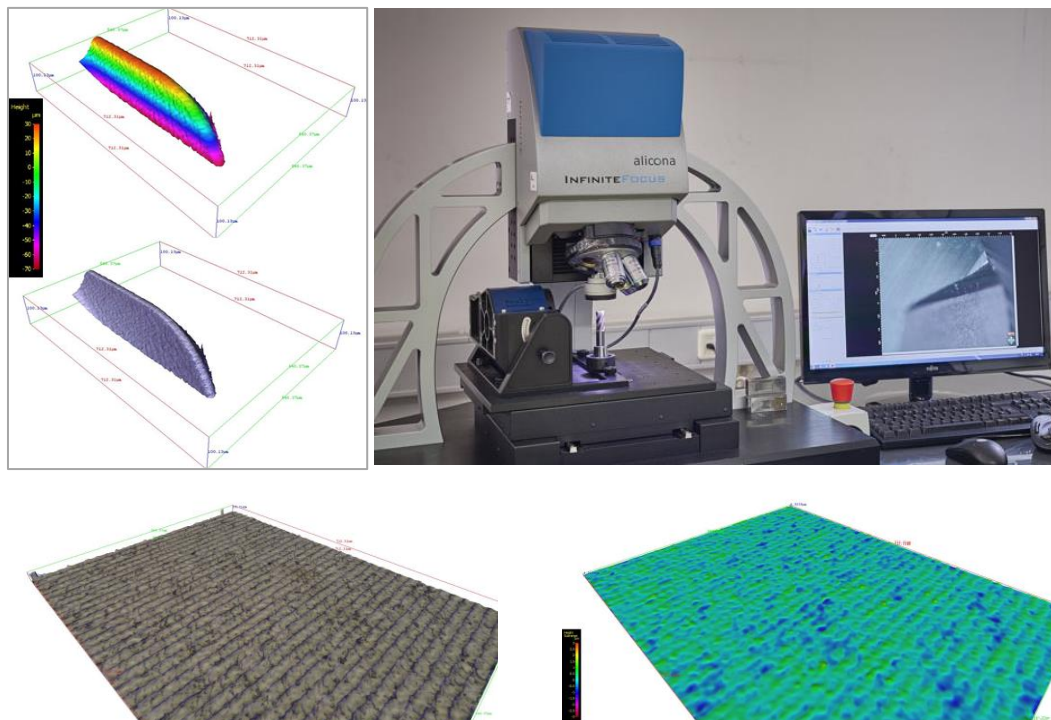


Figura 3. 8- Equipamento utilizado para medição da rugosidade e condições das arestas das ferramentas utilizadas no trabalho - Alicona Infinitefocus G5 (resolução 0,002 μm)

3.9. Microscopia Electrónica de Varrimento

Para que se pudesse observar por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) - (Hitachi S4100 e SU70 equipado com um espectrómetro de energia dispersiva de Raios-X, EDS – DEMAC da UA) a microestrutura das amostras observadas, foi utilizado um suporte onde a amostras foram coladas usando uma fita condutora de carbono.

O mesmo procedimento foi utilizado para observação das aparas e danos nas micro ferramentas utilizadas nos ensaios.

4.Resultados e discussão

De acordo com o apresentado anteriormente a variação das condições de corte promovem alterações na formação da apara, variações na sua morfologia (alterações no mecanismo de ductilidade) e nas condições de fractura do material maquinado. O comportamento está fortemente ligado com o material a maquinar, em particular o nível de dureza. Neste trabalho foram realizados ensaios com alterações dos parâmetros de corte utilizando uma classe de metal duro (Classe 1- [15%Co]), de acordo com a matriz de ensaios de maquinagem definida na Tabela 4. 1. Nestes ensaios também foi avaliada (apenas numa condição específica) a alteração do processo de corte com modificação da classe de metal duro na peça.

O processo de corte na micro fresagem foi avaliado fazendo variar as condições de a_p , v_c , a_e e f_z e estão apresentadas nos pontos 4.2 a 4.5. respectivamente. A avaliação e caracterização do processo de micro fresagem por variação dos parâmetros de corte foi realizada com recurso à observação das aparas formadas e do estado de acabamento das superfícies obtidas.

Nos ensaios de vida útil apresentados no ponto 4.7. foi observado o desgaste e vida útil para cada uma das ferramentas e o respectivo revestimento de diamante definido, é também apresentado neste ponto o modo de falha típico destas ferramentas.

Tabela 4. 1– Matriz de ensaios utilizada nos ensaios para avaliar a o comportamento da apara

Variação a_p

n	Vc (m/min)	n (rpm)	Dci (mm)	ap (mm)	fz (mm/z)	Vf (mm/min)	ae(mm)	S%	T(min)	VB1<0,015
4.1.1	30,5	40000	0,2431049	0,015	0,006	480,00	0,02	23	16	0,01
4.1.2	30,5	34673	0,28	0,02	0,006	416,08	0,02	19	16,5	0,01
4.1.3	30,5	28456	0,34	0,03	0,006	341,47	0,02	15	16,5	0,01
4.1.4	30,5	24772	0,39	0,04	0,006	297,26	0,02	13	18	0,015
4.1.5	30,5	22273	0,44	0,05	0,006	267,27	0,02	12,5	17	0,01

Variação de Vc

4.2.1	40,0	29210	0,4358899	0,05	0,006	350,52	0,02	15	17	0,01
4.2.2	45,0	32861	0,44	0,05	0,006	394,34	0,02	18,5	17	0,01
4.2.3	50,0	36513	0,44	0,05	0,006	438,15	0,02	20,5	11,9	0,1
4.2.4	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,02	23	10	0,01

Variação de ae

4.3.1	54,8	40000	0,4358899	0,05	0,006	480,00	0,05	23,8	16	0,01
4.3.2	54,8	40000	0,4358899	0,05	0,006	480,00	0,08	23,8	16	0,01
4.3.3	54,8	40000	0,4358899	0,05	0,006	480,04	0,11	23,8	16	0,01

Variação de fz

4.4.1	54,8	40000	0,4358899	0,05	0,008	640,00	0,05	23,8	16	0,01
4.4.2	54,8	40000	0,4358899	0,05	0,01	800,00	0,05	23,8	16	0,01
4.4.3	54,8	40000	0,4358899	0,05	0,012	960,08	0,05	23,8	16	0,01

Variação de %Co

4.5.1	54,8	40000	0,4358899	0,05	0,012	960,08	0,11	23,8	16	0,01
-------	------	-------	-----------	------	-------	--------	------	------	----	------

A maquinagem realizou-se em corte-concordante e a seco de acordo com a Figura A. 1 do Anexo 1. As ferramentas utilizadas nos ensaios tinham uma preparação de aresta de acordo com a *condição 1* ($r_e = [15.32 - 17.32] \mu\text{m}$).

4.2.Caracterização dos revestimentos nas ferramentas

Antes de iniciar os ensaios de micro-fresagem o revestimento das ferramentas foi observado após realizar uma fractura frágil num plano perpendicular às arestas de corte, sendo posteriormente observadas no SEM (Hitachi S4100 ou SU70). Observou-se a microestrutura, a sua homogeneidade e espessura do revestimento de diamante.

Nas Tabelas 4.2 à 4.5. estão apresentadas as a caracterizações feitas da estruturas das estudadas e processadas nas ferramentas de ensaio.

Tabela 4. 2- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo A

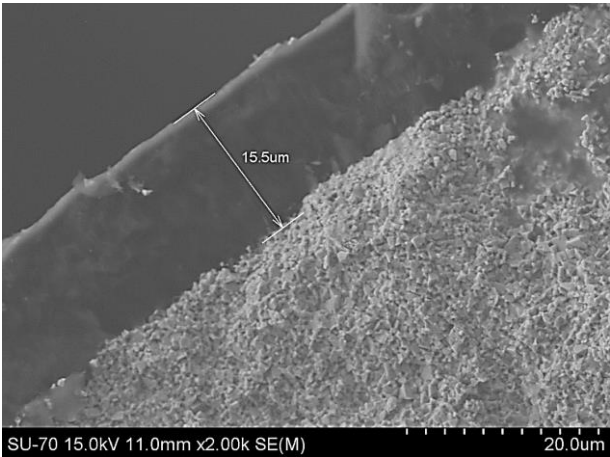
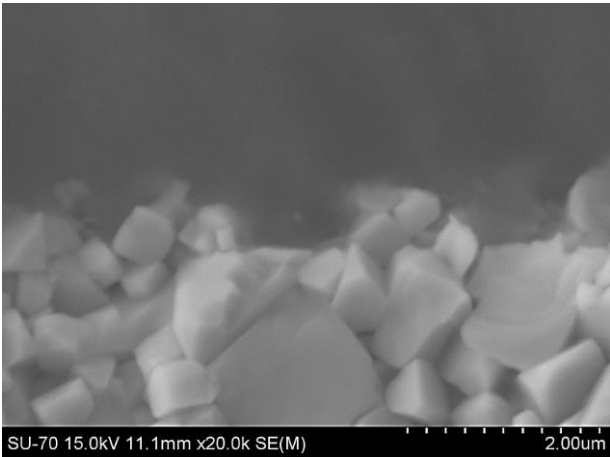
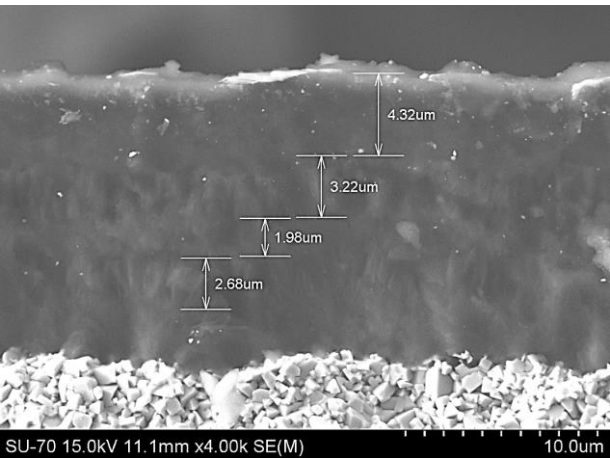
Designação da Estrutura	TIPO A (S/MCD/NCD/MCD/NCD)
<p>Imagens das estruturas (SEM)</p> <p><i>Espessura total</i></p> <p><i>15-16μm</i></p> <p><i>(MCD: 2,5-4μm) mais espessas do que as intermédias de nanocrystalino (NCD: 1-1,5μm).</i></p> <p><i>A camada de nucleação tem cerca de 1-1,5μm. Camada exterior é de NCD (5-6μm)</i></p>	 
<p>Estrutura:</p> <p>NCD</p> <p>MCD</p> <p>NCD</p> <p>MCD(nucleação)</p> <p>Substrato</p>	

Tabela 4. 3- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo B


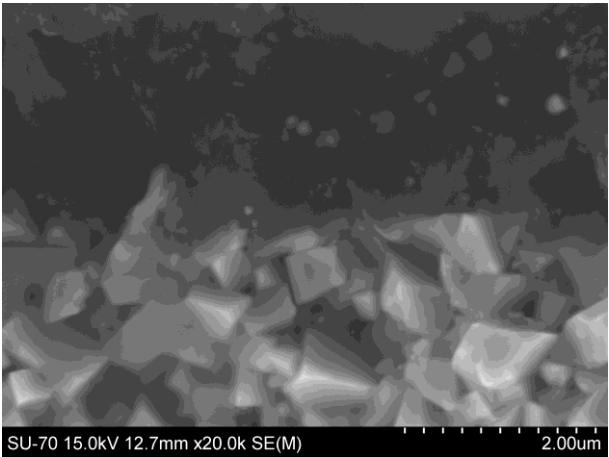
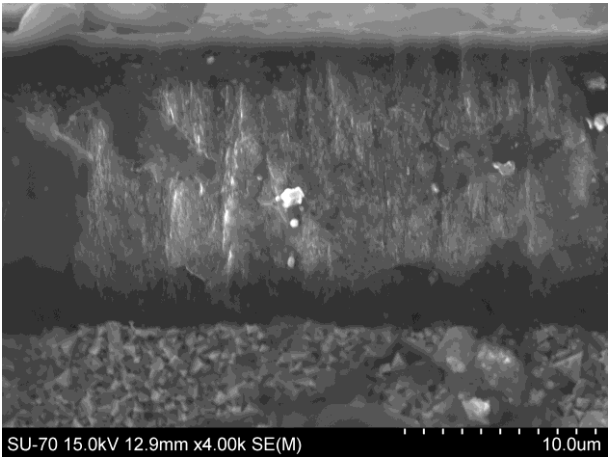
Designação da Estrutura	Tipo B (S/ NCD/ MCD/NCD/MCD/NCD)
<p>Imagens das estruturas (SEM)</p> <p><i>Espessura total</i></p> <p><i>15-16μm</i></p> <p><i>(MCD: 4-4μm) mais espessas do que as intermédias muito reduzida nanocristalino (NCD: 0,5μm).</i></p> <p><i>A camada de nucleação tem cerca de 2 μm. Camada exterior é de NCD (2 μm)</i></p> <p>Estrutura:</p> <p>NCD</p> <p>MCD</p> <p>NCD (muito reduzida)</p> <p>MCD</p> <p>NCD(nucleação)</p> <p>Substrato</p>	  

Tabela 4. 4- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo C

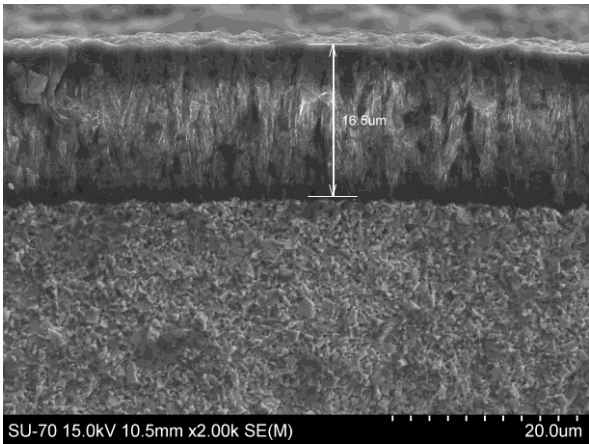
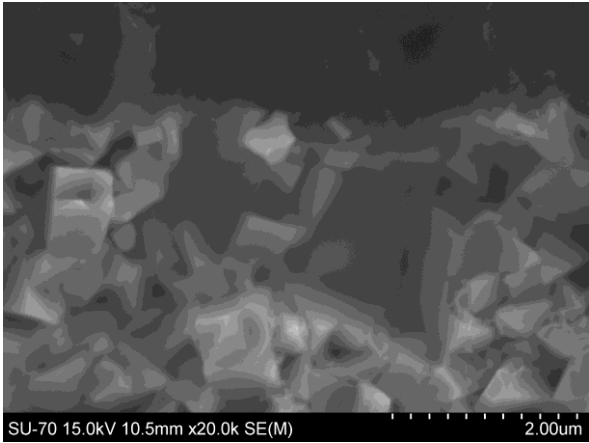
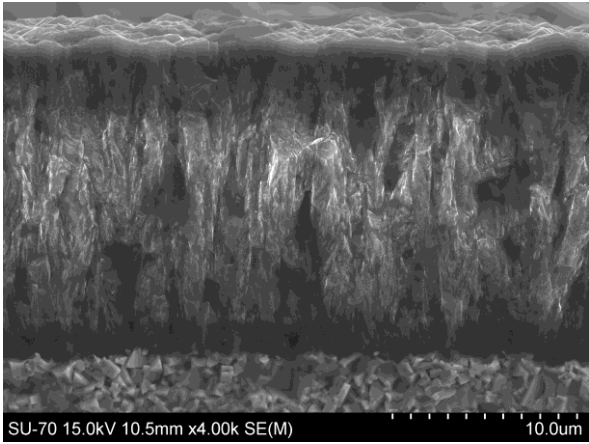
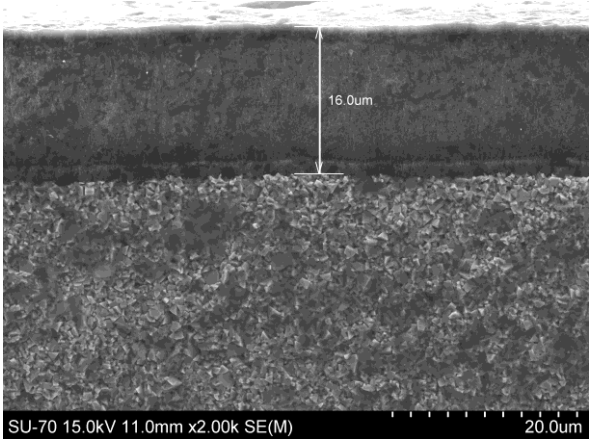
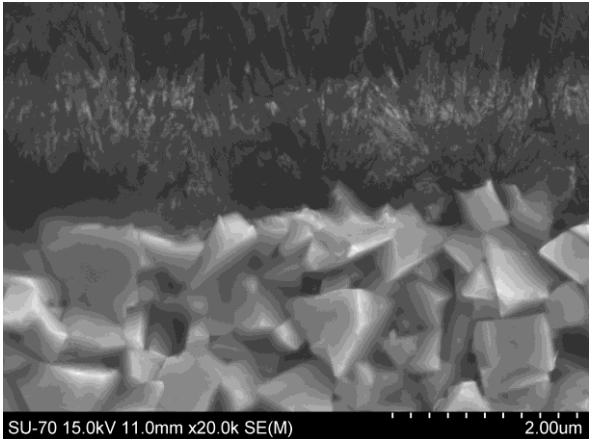
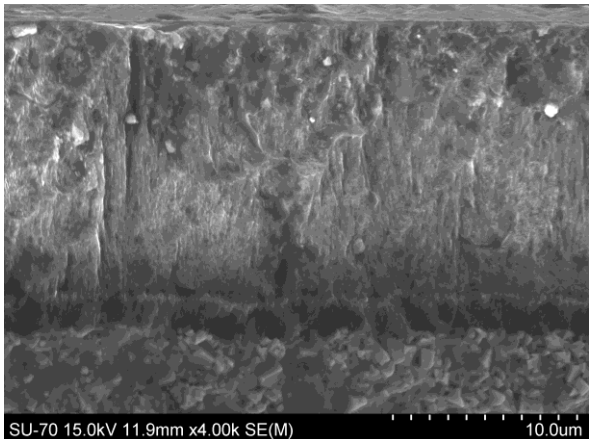
Designação da Estrutura	Tipo C (S/NCD/MCD/NCD)
<p>Imagens das estruturas (SEM)</p> <p><i>Espessura total</i></p> <p><i>16-17μm</i></p> <p><i>(MCD: 11 μm) mais espessas do sem camadas intermédias</i></p> <p><i>A camada de nucleação tem cerca de 2 μm. Camada exterior é de NCD (1,5 μm)</i></p> <p>Estrutura:</p> <p>NCD</p> <p>MCD</p> <p>NCD (nucleação)</p> <p>Substrato</p>	  

Tabela 4. 5- Resumo da Caracterização da estrutura – Tipo D

<i>Designação da Estrutura</i>	Tipo D (S/MCD/NCD/MCD/NCD)
<p>Imagens das estruturas (SEM)</p> <p><i>Espessura total</i></p> <p><i>16-17μm</i></p> <p><i>(MCD: 9 μm) mais espessas do com uma camada NCD pouco esfeça logo no início</i></p> <p><i>A camada de nucleação tem cerca de MCD 2 μm.</i></p> <p><i>Camada exterior é de NCD (1 μm)</i></p> <p><i>Estrutura:</i></p> <p>NCD</p> <p>MCD</p> <p>NCD</p> <p>MCD (nucleação)</p> <p>Substrato</p>	  

Na Figura 4.1. é possível ver o detalhe do metal duro na proximidade do interface, verificando-se que na ferramenta com estrutura A,B,C o cobalto foi removido até uma profundidade de 2,5 a 3 μm , na estrutura D este fenómeno quase não foi detectado.

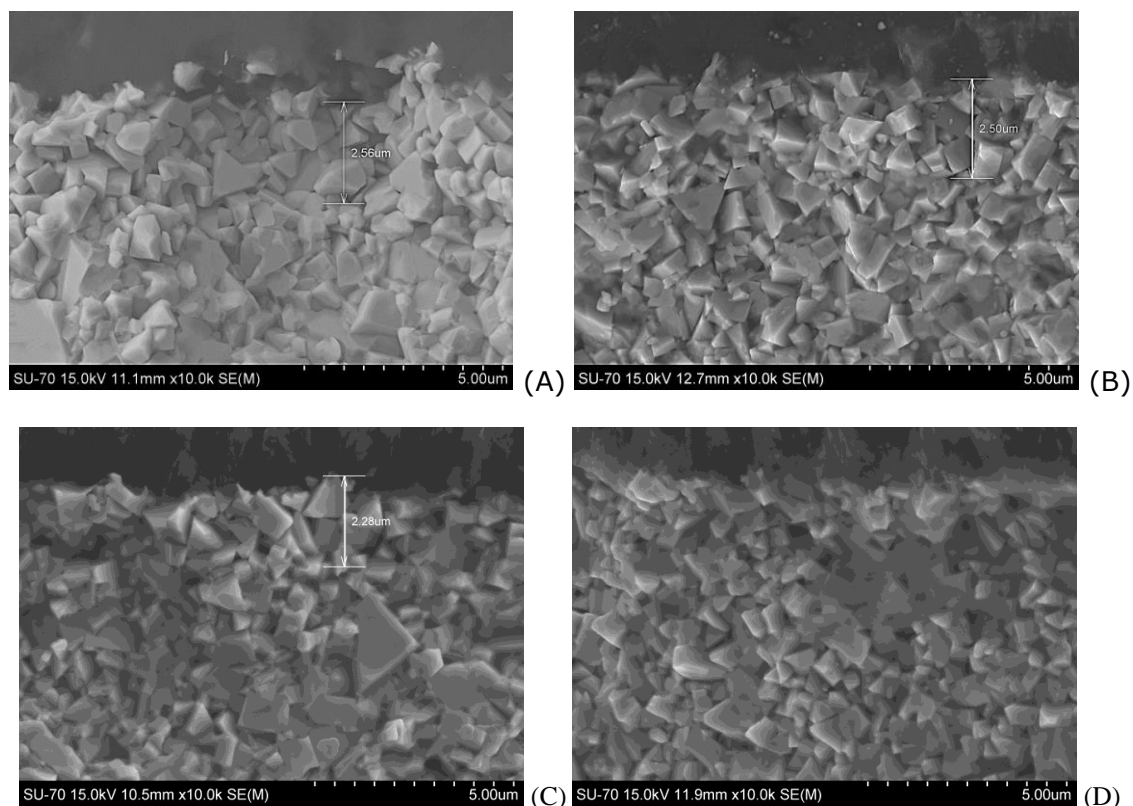


Figura 4. 1– Imagem de SEM da estrutura e zona do interface sem Co: (A) Estrutura Tipo A; (B) Estrutura Tipo B; (C) Estrutura Tipo C ; (C) Estrutura Tipo D

4.2. Variação do comportamento da apara com a alteração da profundidade de corte

A alteração da profundidade de corte é proporcional à espessura da apara, a utilização de valores muito baixos deste parâmetro teve o objectivo de avaliar possíveis falhas na deformação e a aproximação a valores de espessura de apara mínima crítica. Dos ensaios foi possível detectar que mesmo para valores abaixo do raio da aresta da ferramenta ($r_e < 17,5 \mu\text{m}$) a deformação do metal duro foi processada e as aparas formadas (Figura 4. 2.) As variações detectadas no comportamento da apara foram maioritariamente dimensionais. A maior quantidade de material cortado, provocada pelo aumento da profundidade de corte originou aparas de dimensão superior. É possível ver também que para $a_p = 0,015 \text{ mm}$ as aparas apresentam uma formação mais instável. Porém existiu um eficiente corte para todas as condições de profundidade de corte testadas.

As variações na qualidade das superfícies maquinadas foram medidas por avaliação dos parâmetros da rugosidade, Ra e RMS. Na avaliação feita pela medição do parâmetro Ra não são detectadas variações significativas nos valores com a alteração da profundidade de corte (Figura 4. 3).

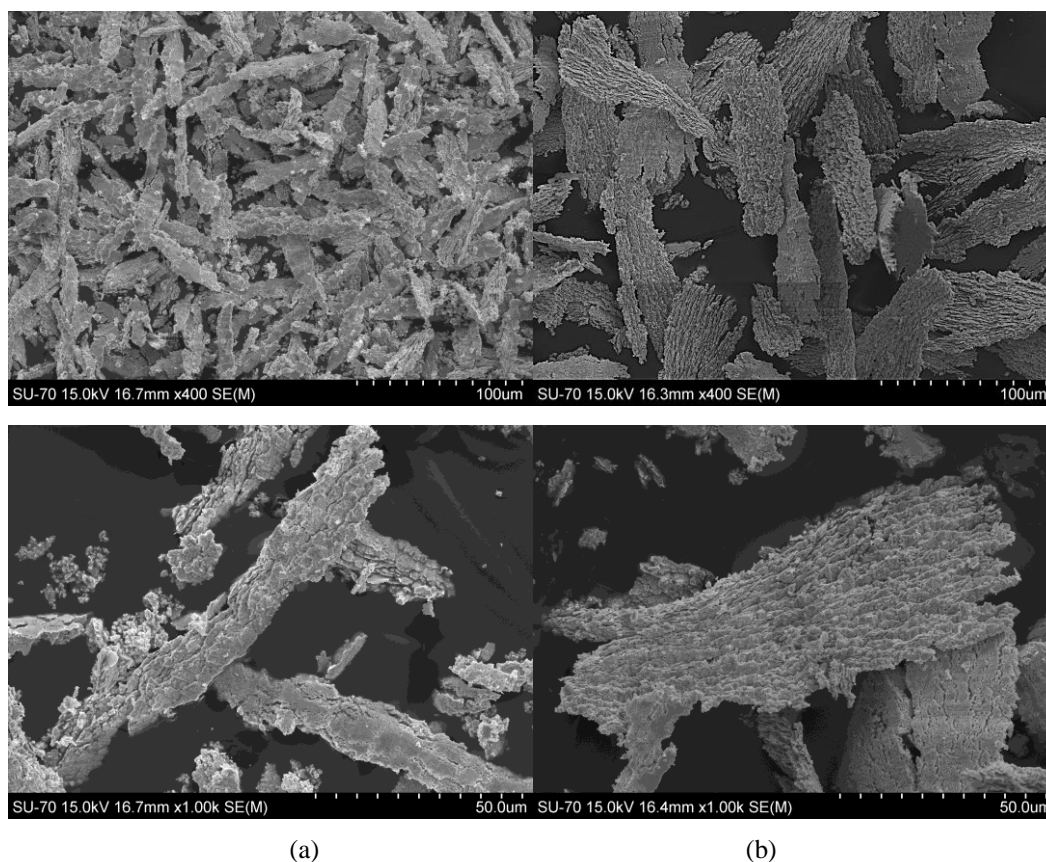


Figura 4. 2- Imagens –SEM(SU-70) das aparas : (a) $ap=0,015$ mm ; (b) $ap=0,05$ mm

De forma ampliada a medição do RMS parece não detectar alterações nos perfis com a variação da profundidade de corte. A superior deformação e aumento da espessura da apara introduzida pelo aumento da profundidade de corte não alteraram a qualidade da superfície maquinada apesar das alterações dimensionais na forma da apara.

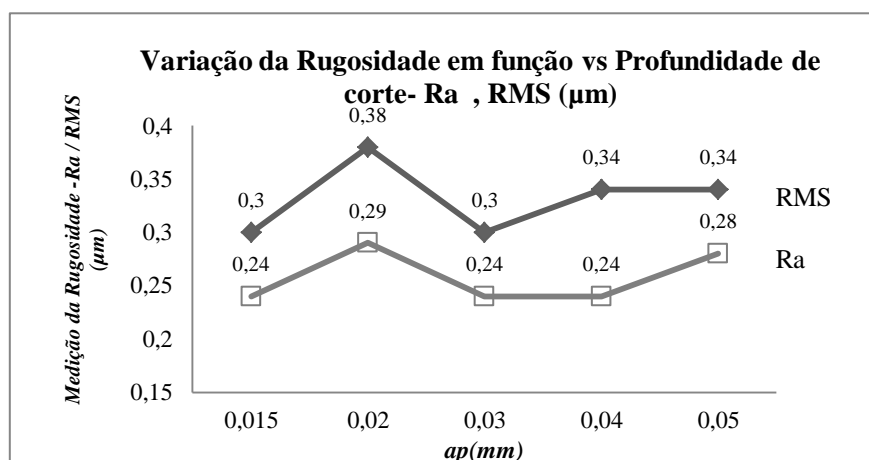


Figura 4. 3- Gráfico da variação da Rugosidade em função vs Profundidade de corte- Ra , RMS (µm)

4.3. Variação do comportamento da apara com a alteração da velocidade de corte

A alteração das condições da velocidade corte permitiram detectar formas nas aparas removida diferentes ao logo das condições testadas. As aparas recolhidas e analisadas mostram uma deformação e curvatura superior para velocidade de corte superiores (Figura 4. 4). No entanto as alterações das aparas provocadas por aumentos de temperatura e condições térmicas típicas do aumento da velocidade não foram detectadas. A redução do ciclo de formação da apara mostrou uma fragmentação superior em velocidades de corte superiores.

Com a variação da velocidade de corte a rugosidade na superfície da peça maquinada parece não ser alterada, o valor de RMS parece mostrar uma tendência na alteração do perfil das superfícies maquinadas mas os valores são pouco significativos (Figura 4. 5).

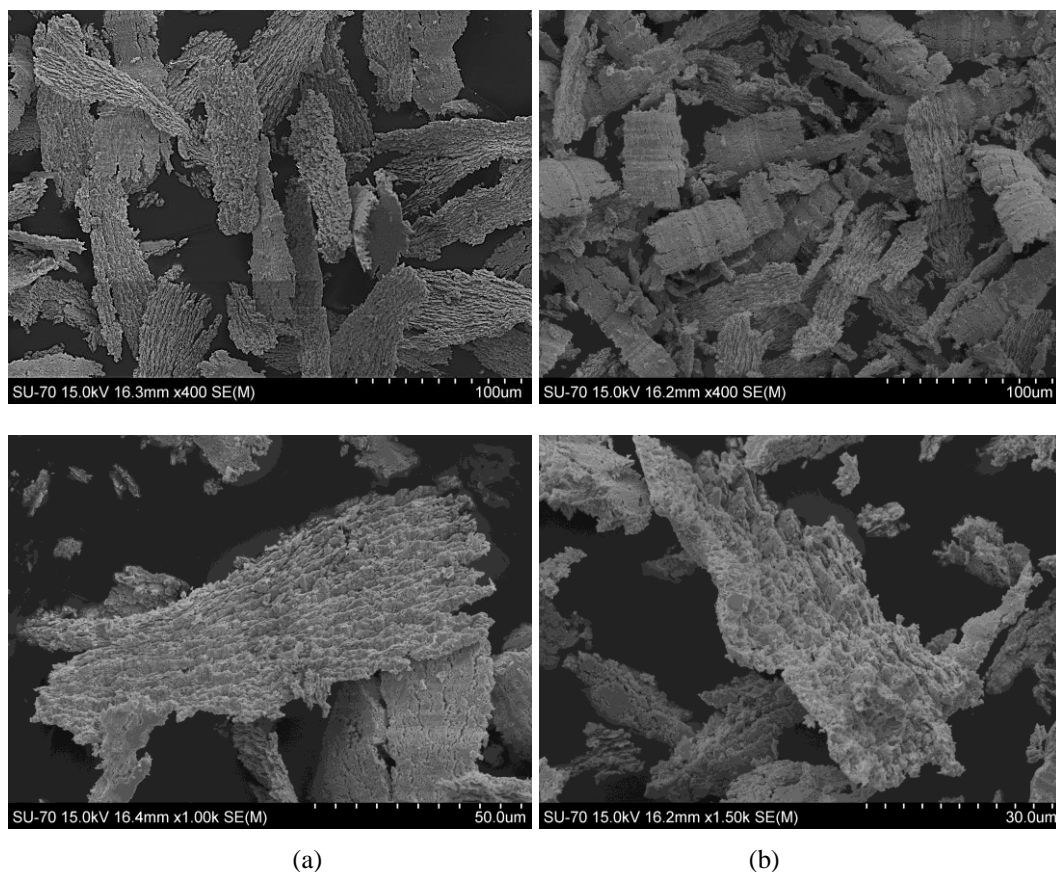


Figura 4. 4– Imagens –SEM(SU-70) das aparas : (a) $V_c = 30,5 \text{ m/min}$; (b) $V_c = 54,8 \text{ m/min}$

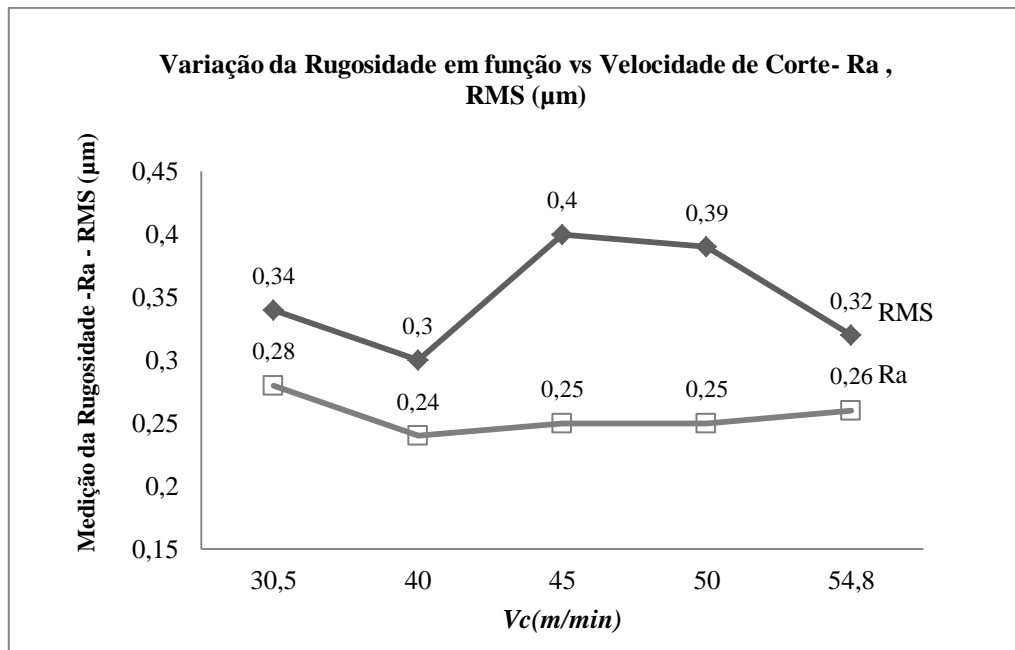


Figura 4. 5– Gráfico da variação da Rugosidade em função vs velocidade de corte- Ra , RMS (μm)

4.4. Variação do comportamento da apara com a alteração da largura de corte

O parâmetro que apresentou maior influencia na alteração da rugosidade foi a largura de corte. De acordo com a definição teórica, este valor quando se utiliza ferramentas esféricas, tem elevada influência no estado de acabamento das superfícies, o seu aumento é quase directamente proporcional à largura de corte. Como resultado da alteração da altura do perfil (*scalop height*). As características do material maquinado fazem com que altura do perfil por passagem não seja sempre crescente, na largura superior ensaiada a extremidade parece começar a fracturar (Figura 4. 7).

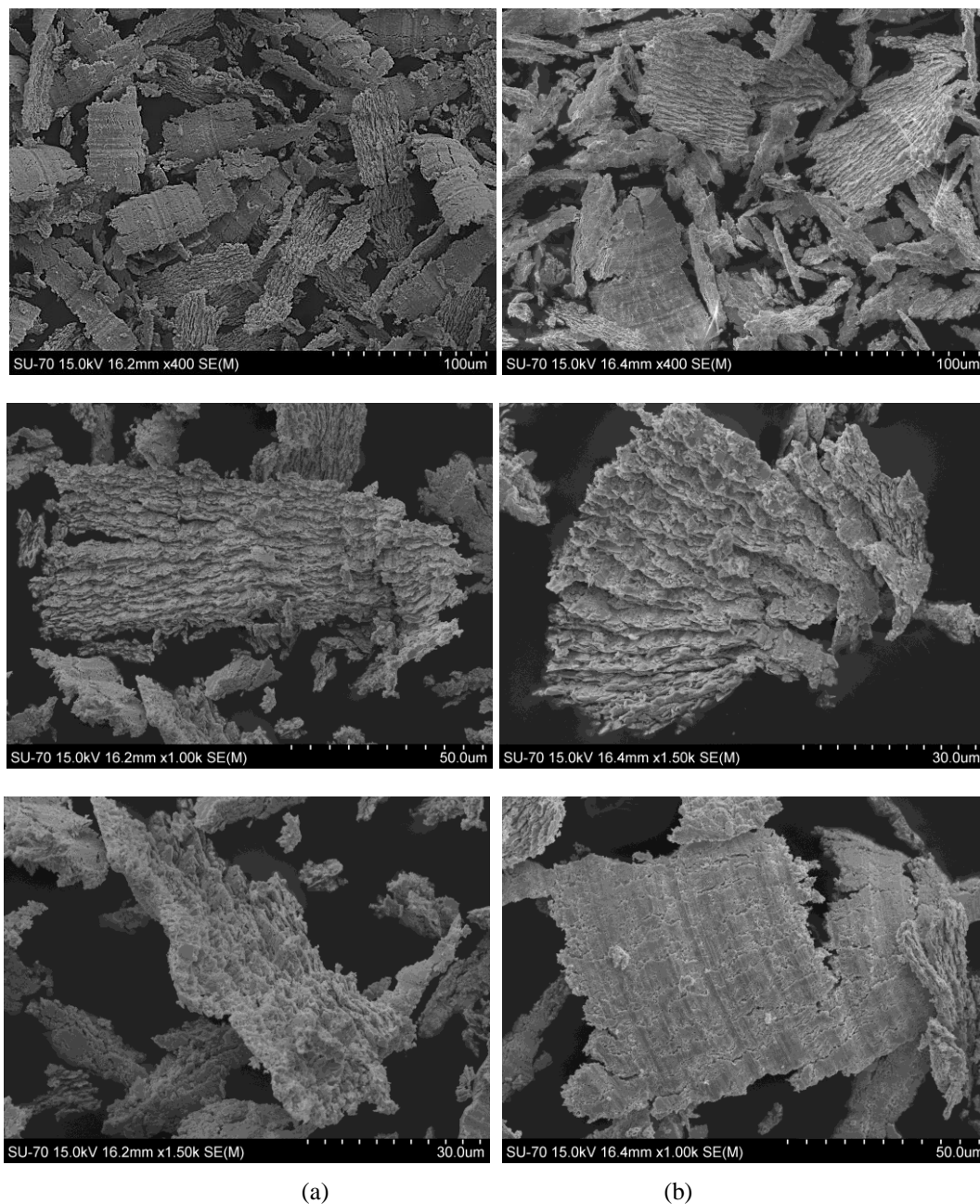


Figura 4 .6– Imagens –SEM(SU-70) das aparas: (a) $ae= 0,02\text{ mm}$; (b) $ae = 0,11\text{ mm}$

A observação das aparas mostram uma alteração na geometria e um aumento da deformação, as aparas observadas têm uma curvatura reduzida (Figura 4 .6).

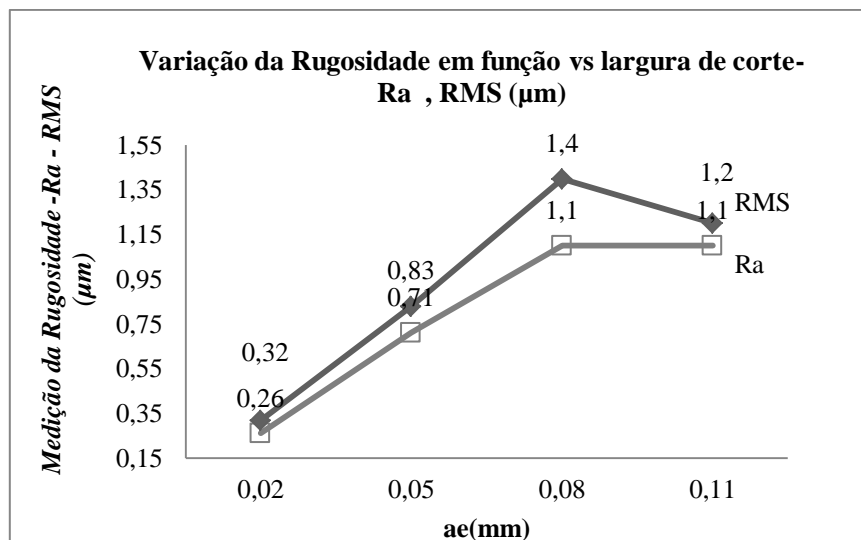


Figura 4. 7– Gráfico da variação da Rugosidade em função da largura de corte- Ra , RMS (μm)

4.5. Variação do comportamento da apara com a alteração do avanço

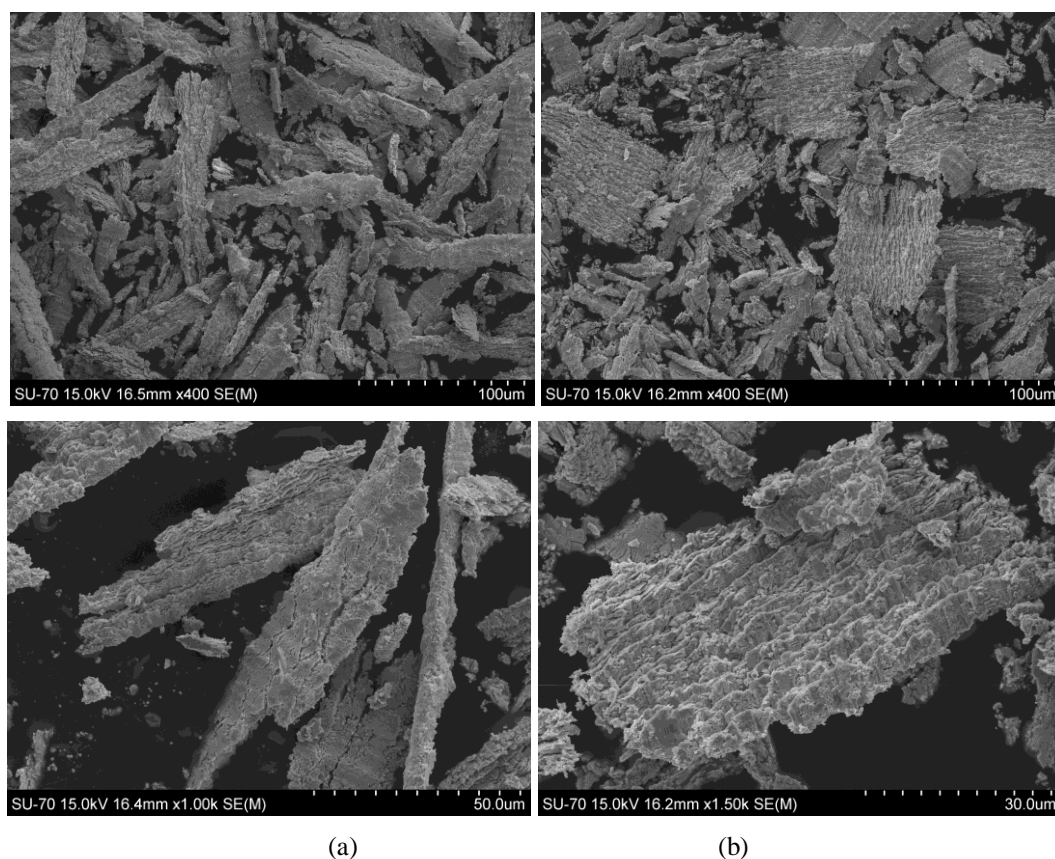


Figura 4 .8– Imagens –SEM(SU-70) das aparas: (a) $f_z= 0,006 \text{ mm/z}$; (b) $f_z=0,012 \text{ mm/z}$

O avanço por dente mostrou ter um efeito elevado e linear na qualidade das superfícies maquinadas e na deformação da apara. Pela observação feita (Figura 4 .9) as aparas de em condições de avanço superior são mais segmentadas. Com o aumento do avanço a para espessura das aparas são superiores (Figura 4 .8).

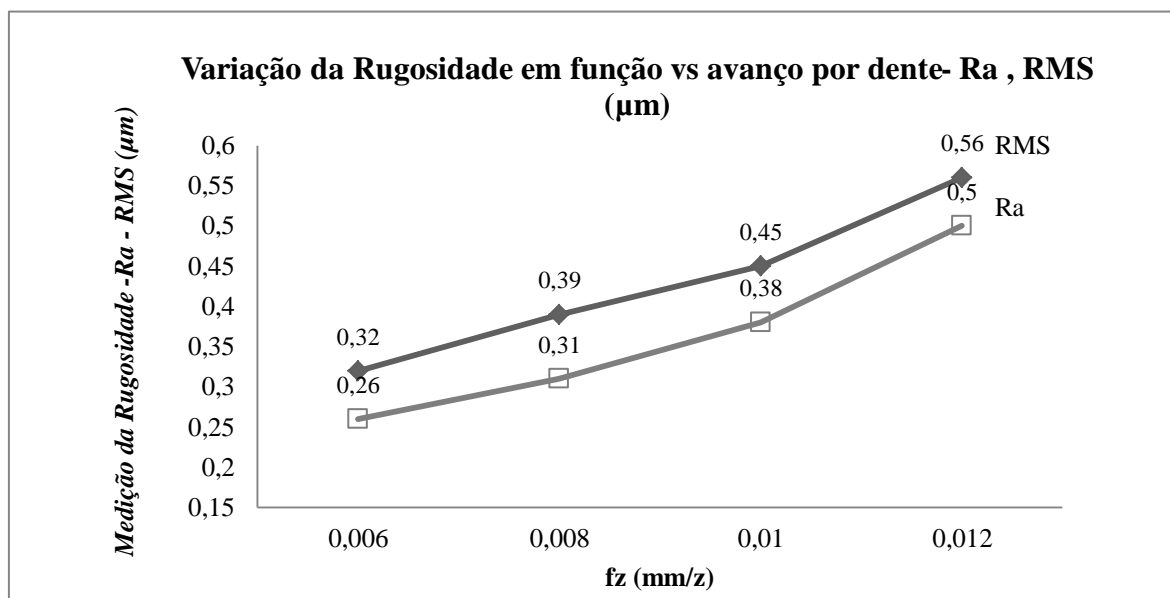


Figura 4 .9– Variação da Rugosidade em função do avanço por dente- Ra , RMS (μm)

4.6. Variação do comportamento da apara com a alteração da Classe de Metal duro

Na avaliação feita pela fresagem das duas classes de metal duro, o comportamento detectado foi muito diferenciado (Figura 4 .10). Os materiais responderam de maneira muito distinta ao processo de micro fresagem. A deformação do material foi distinta com a formação de aparas de comprimentos muito reduzidos na classe de metal duro com menor teor de Co e tamanho de grado micrométrico em comparação com a classe de maior teor de Co(Figura 4. 11).

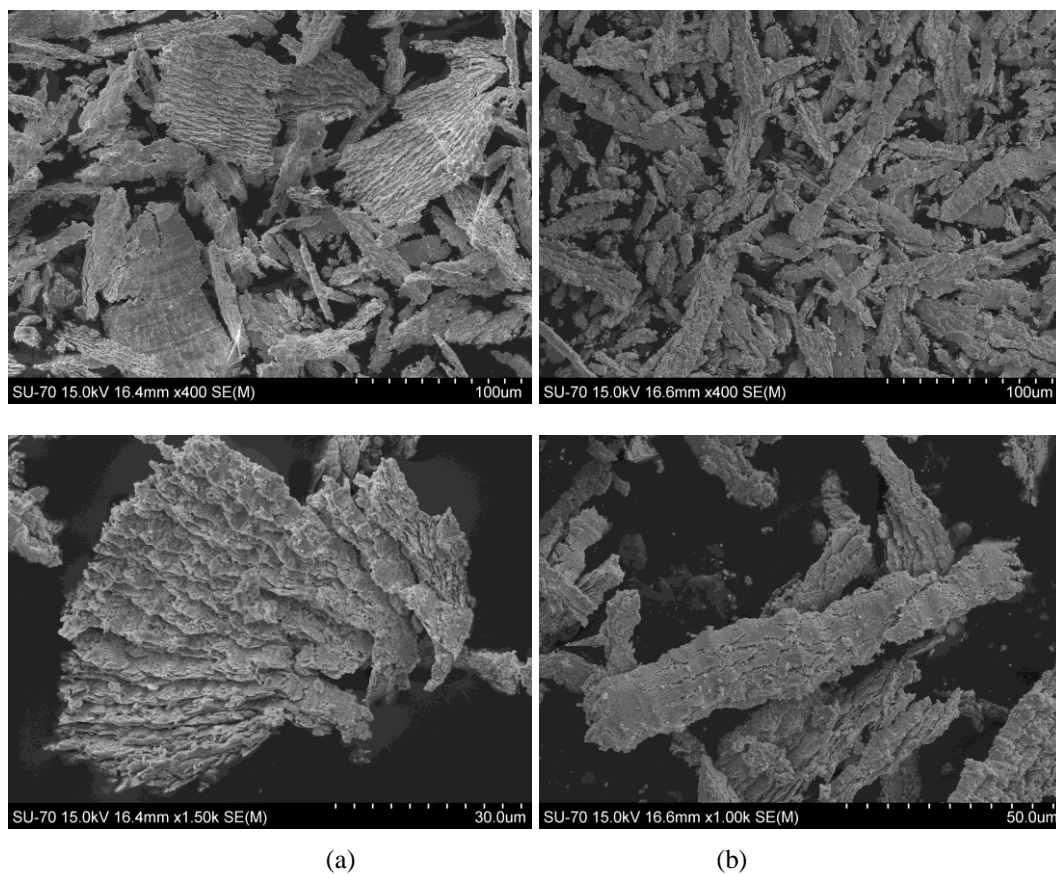


Figura 4 .10– Imagens –SEM(SU-70) das aparas: (a) CLASSE 1(Co15% -- WC3,0) ; (b) CLASSE 1(Co10%-- WC 0,8)

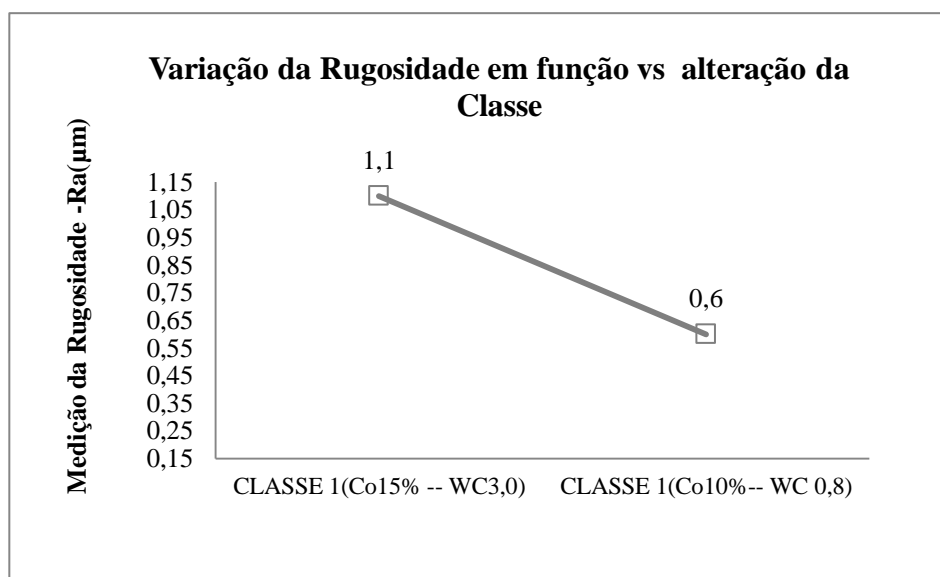


Figura 4. 11– Variação da Rugosidade em função da alteração da classe metal duro- Ra (µm)

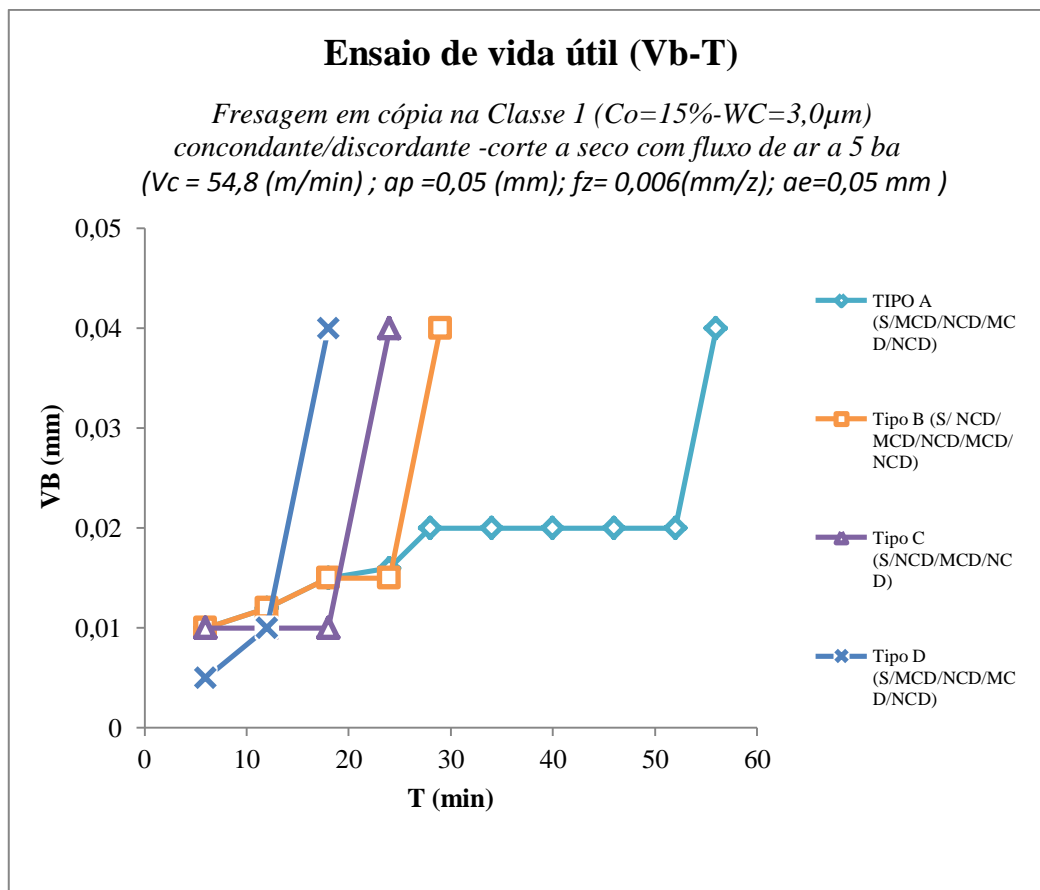
4.7. Ensaios de vida útil nas várias estruturas de revestimento

Os ensaios de maquinagem tiveram como objectivo principais avaliar a resposta das ferramentas em diversas condições de maquinagem de acordo com a matriz de ensaios da Tabela 4.6. Com os ensaios realizados foi possível detectar o comportamento das combinações geometria/revestimento em diversas condições de micro fresagem. A observação cuidada do modo de falha permitiu também definir um modo de falhar típico desta aplicação e algumas condições relevantes para optimização das ferramentas e processo de fresagem.

Tabela 4. 6– Matriz de ensaios utilizada nos ensaios para avaliar vida útil das ferramentas

Fresagem é cópia na Classe 1 (Co=15%-WC=3,0µm) concordante/discordante -Corte a Seco com fluxo de ar a 5 bar

	Revestimento	Vc (m/min)	n (rpm)	Dci (mm)	ap (mm)	fz (mm/z)	Vf (mm/min)	ae(mm)	T (min)
.5.1.1	Tipo A	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	56
.5.1.2	Tipo B	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	29
.5.1.3	Tipo C	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	24
.5.1.4	Tipo D	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	18
Avaliação da activação mecânica da superfícies com WETBLASTING									
5.5.2.1	Tipo D	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	18
5.5.2.2	Tipo D + Jact.M.Húmido (condição 2- M320)	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	56
Variação da profundidade de corte									
5.5.3.1	Tipo B	54,8	40000	0,28	0,02	0,006	480,00	0,05	52
5.5.3.2	Tipo B	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	29
Variação do avanço									
5.5.4.1	Tipo A	54,8	40000	0,44	0,05	0,005	400,00	0,05	60
5.5.4.2	Tipo A	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	56
Fresagem é cópia na Classe 2 (Co=10%-WC=0,8µm) concordante/discordante -Corte a Seco com fluxo de ar a 5 bar									
5.5.5.1	Tipo A	54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	30



**Figura 4 .12– Gráfico das curvas T-Vb no ensaio de fresagem em cópia na Classe 1 ($Co=15\%-WC=3,0\mu m$)
concordante/discordante -corte a seco com fluxo de ar a 5 bar**

Os ensaios de vida útil apresentados na Figura 4 .12.mostram a resposta positiva da ferramenta com a estrutura de revestimento Tipo A. A estrutura com maior presença de NCD apresentou uma diferença positiva na vida útil da ferramenta. A segunda melhor resposta (ferramenta com Tipo B) comprova esta evidência e a necessidade de introduzir camadas múltiplas de NCD ao longo da estrutura.

Em todos os ensaios sempre que o valor de desgaste de flanco subiu acima de $VB_{m\acute{a}x} > 0,040$ mm (nestas condições o substrato na zona das faces de alívio/flanco na ferramenta ficavam exposta, sem presença de revestimento) a ferramenta em utilização teve um exponencial desgaste de flanco e uma quase instantânea quebra da aresta. Os ensaios foram repetidos três vezes e o comportamento foi constante com vidas úteis sempre equivalentes.

O comportamento e a resposta da ferramenta para diferentes condições de preparação de superfícies e raio de aresta é apresentado na Figura 4. 13. Nesta avaliação é visível uma influência positiva nas ferramentas com a *Condição 2* de preparação de aresta. Este efeito poderá se explicado também pela alteração das condições de adesão do revestimento.

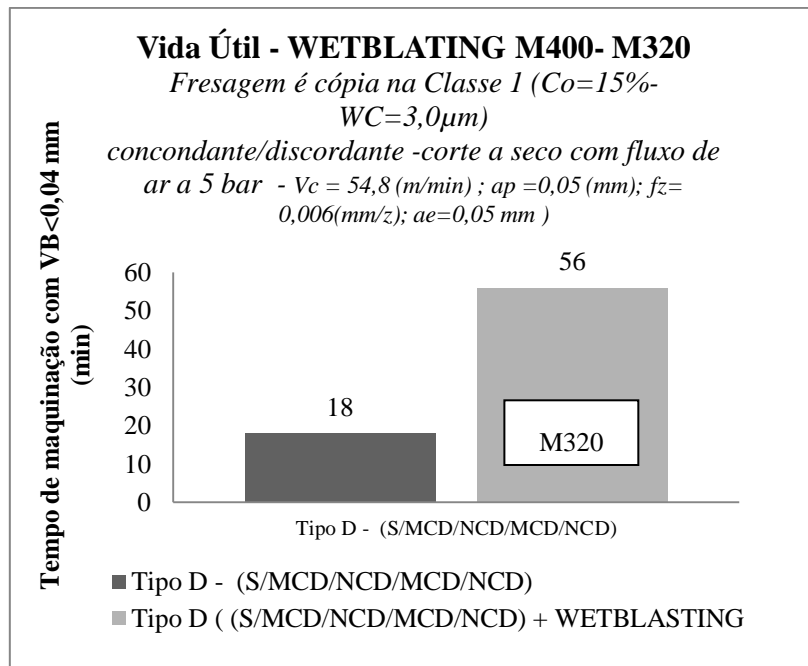


Figura 4. 13– Vida útil das ferramentas com a mesma estrutura de revestimento mas com tratamento de preparação de superfície diferentes

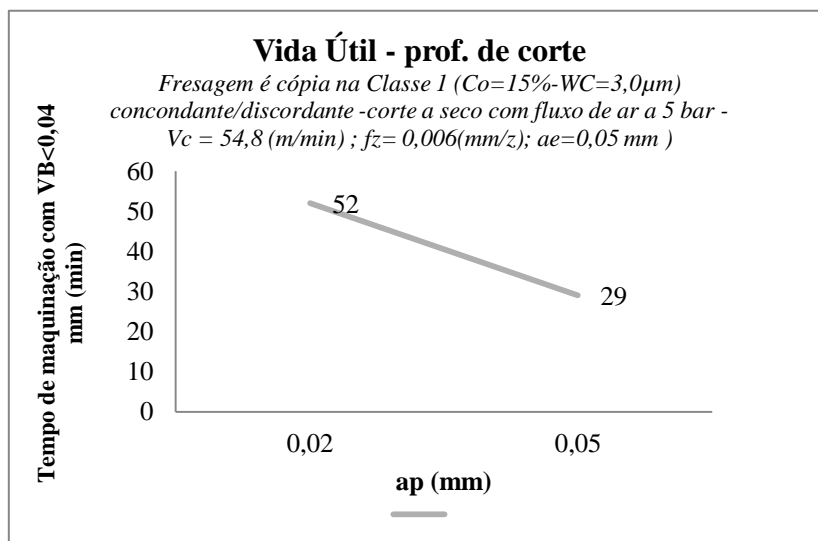


Figura 4. 14 – Vida útil da ferramenta com condições de profundidade de corte diferentes

A avaliação feita pelos ensaios de micro fresagem onde a vida útil foi controlada pela avaliação do desgaste máximo de flanco ($VB < 0,04$ mm) apresentada nos gráficos das Figuras 4.14 e 4.15 mostra um influência negativa do aumento das condições de profundidade de corte e avanço por dente superiores. O aumento destas condições de corte apresenta uma superior carga específica nas arestas e a delaminação superiores do revestimento. Foi detectada uma maior influência da profundidade de corte que pode ser explicada pelas exigências superiores nas arestas perto da zona central de velocidade de corte nula.

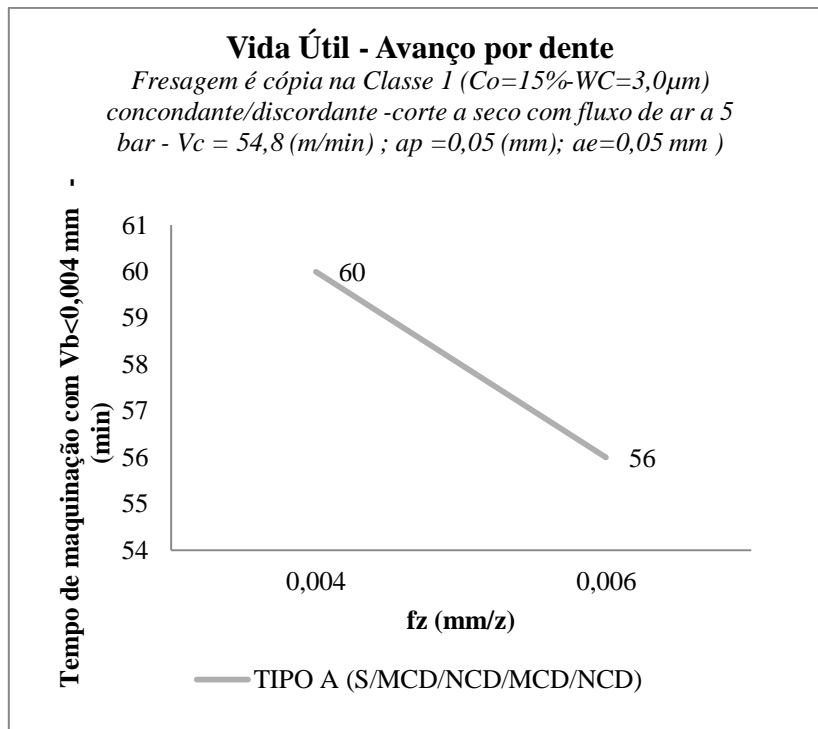


Figura 4. 15 – Vida útil da ferramenta com condições de avanço por dente diferentes

Os ensaio de vida útil apresentados em detalhe nos gráficos das Figuras 4.16 , 4.17 e 4.18 mostram um característica comum no modo de falha de todas as ferramentas. Todas as ferramentas ensaiadas apresentam uma delaminação elevada do revestimento na face de ataque desde o início dos ensaios. Nestas faces adjacentes à aresta de corte em trabalho o revestimento é eliminado logo nos primeiros minutos dos ensaio, porem o desempenho da ferramenta mantêm-se estável sem grande alteração da apara ou da qualidade das superfícies maquinadas. Por outro lado as faces de alívio contíguas às mesmas arestas de corte têm durante os ensaios um desgaste muito estável do revestimento. A falha e limite de vida útil são atingidos logo que o substrato fica exposto nestas superfícies (Figura 4.18).

A comparação do modelo de falha das ferramentas com revestimento tipo A e B mostram que existe um diferente nível de delaminação na face de ataque entre as duas estruturas. A ferramenta com o revestimento tipo B tem uma delaminação mais generalizada da face de ataque.

No Figura 4. 18 apresenta as diferenças no modo de falha entre duas ferramentas iguais mas com preparação de aresta e superfície diferentes. Apesar de ser possível ver que fractura e delaminação na face de ataque similares o raio superior da aresta e a possível alteração na adesão (Condição 2) permitem que o desgaste na zona da aresta e face de alívio seja reduzido com uma superiores vida útil.

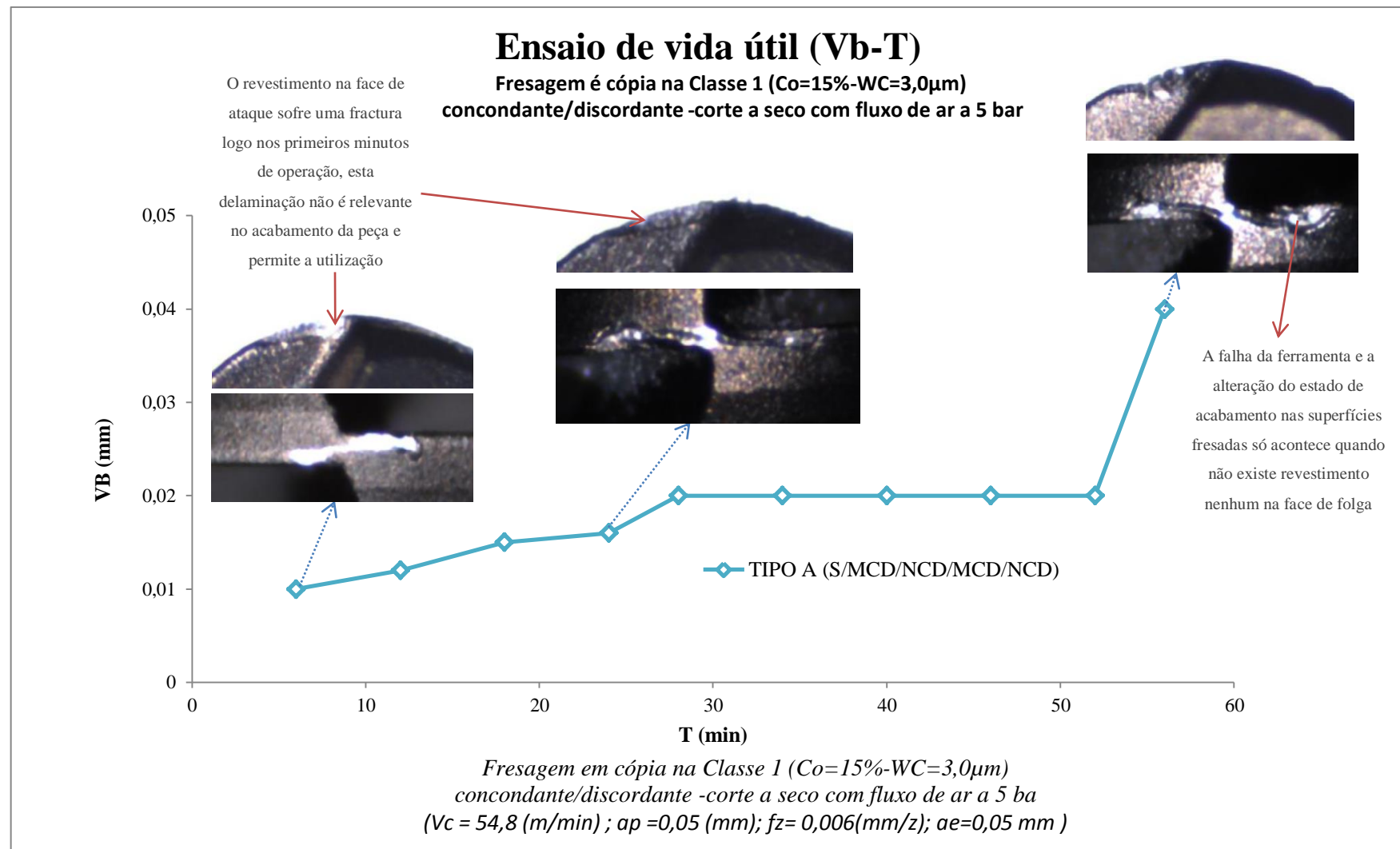


Figura 4. 16 – Evolução do modo de falha da ferramenta Tipo A

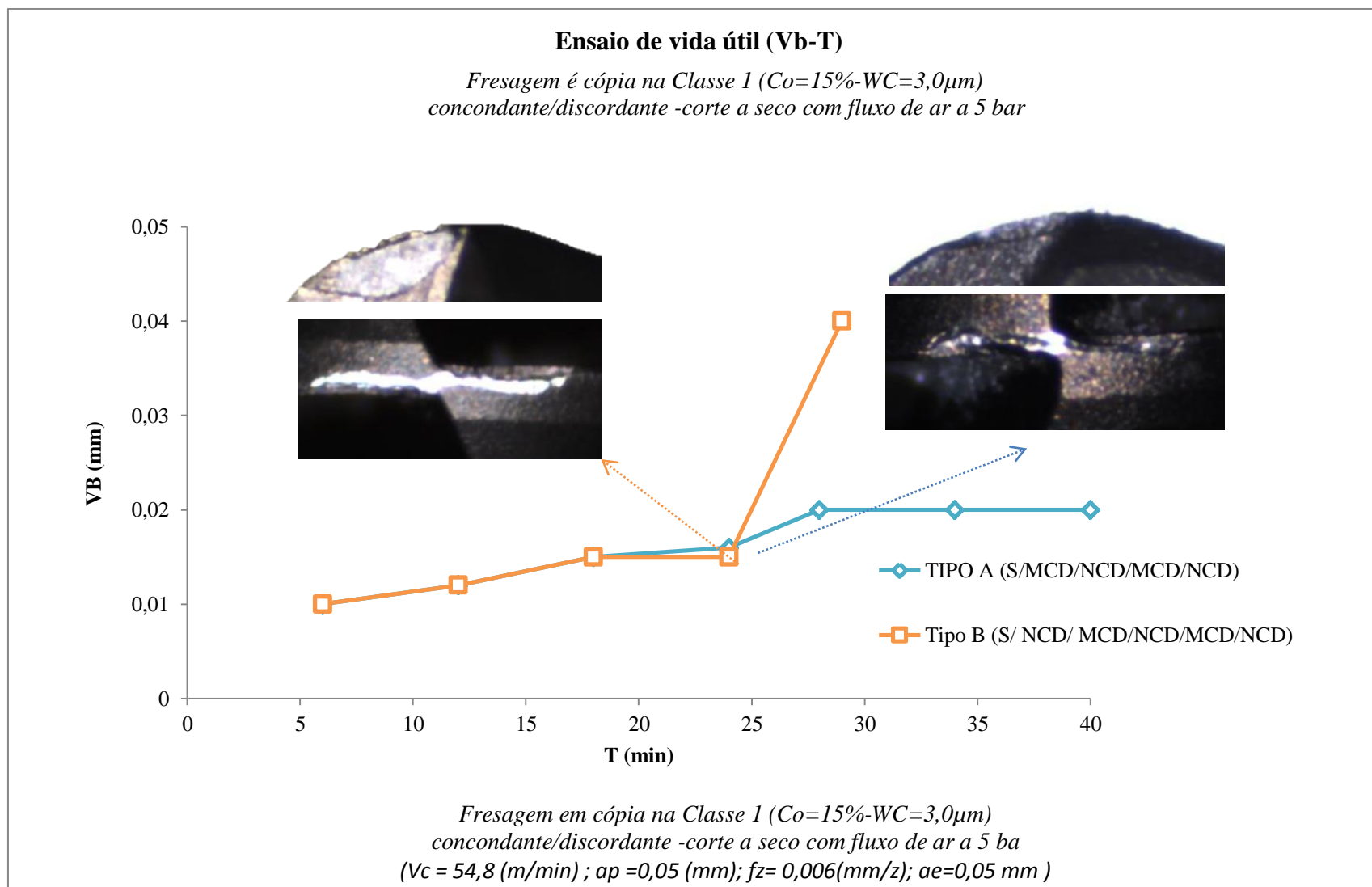


Figura 4. 17 – Comparação entre a evolução do modo de falha da ferramenta Tipo A e B

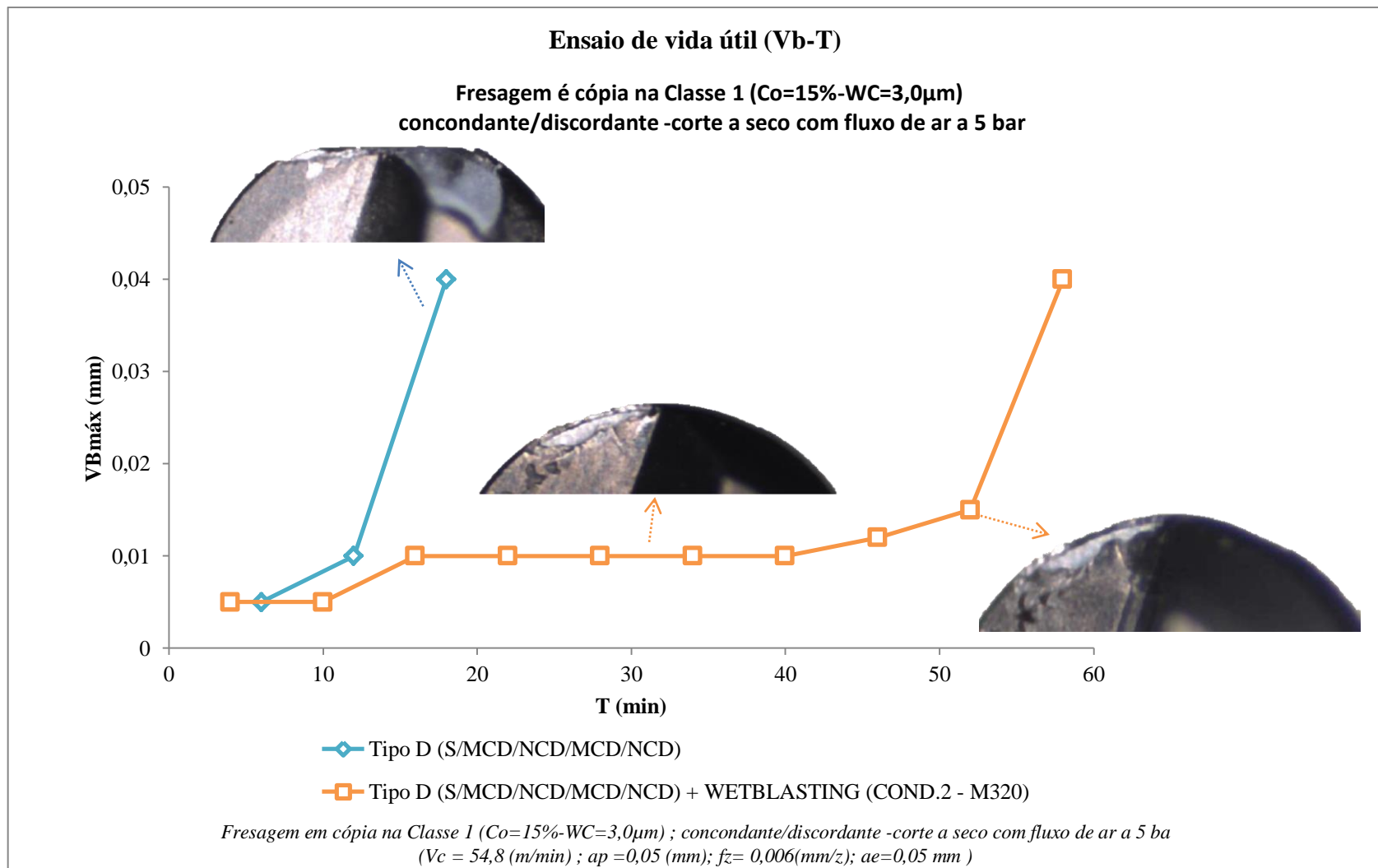
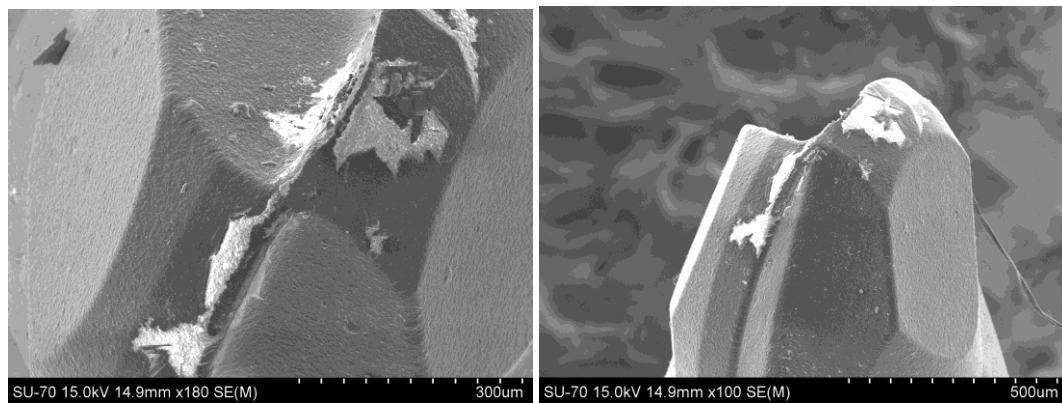
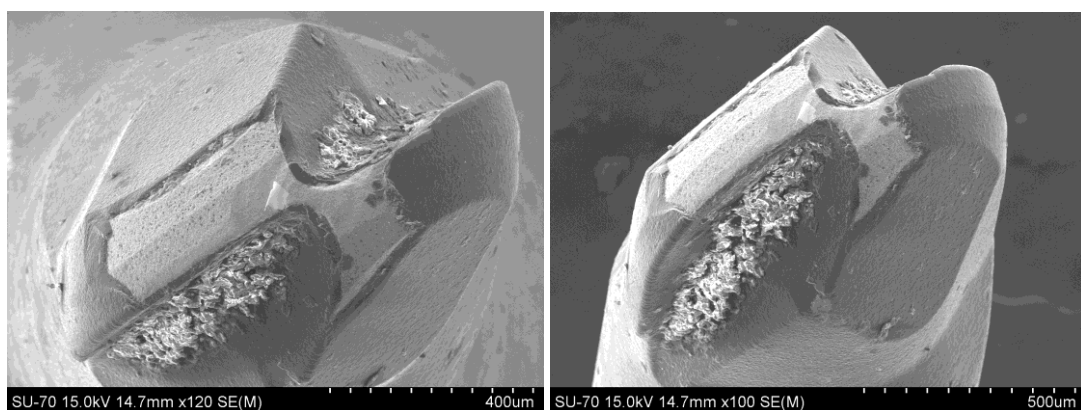


Figura 4. 18 – Comparação entre a evolução do modo de falha da ferramenta com preparação de aresta COND 1 e COND 2



(a)



(b)

Figura 4. 19 – Falha característica das ferramentas Tipo A durante o ensaio de vida útil representado no gráfico da figura 4.15: (a) após 25 min; (b) após 55 min

5. Conclusões e trabalhos futuros

As operações de micro-fresagem em materiais de elevada dureza tem elevado potencial e podem ser realizadas de forma eficiente, no entanto a mecânica de corte não passam por uma simples aplicação de um efeito de escala ao processo convencional de fresagem. Na micro maquinagem os fenómenos de espessura mínima de apara são importantes e podem alterar a eficiência das ferramentas e do processo. Por outro lado a fresagem de materiais de elevada dureza afasta-se da maquinagem convencional provocando alterações significativas na formação da apara, rácios de compressão, nos ângulos de corte, na influência que os ângulos / preparação de aresta da ferramenta provocam na mecânica do corte e na resposta das ferramentas ao longo da evolução do desgaste. Ao mesmo tempo os processos de micro fresagem e HM estão largamente dependentes de melhorias nas especificações das ferramentas, nos seus materiais e geometrias. A utilização de revestimento de diamante HF-CVD mostrou ser uma boa solução para potenciar as propriedades tribológicas das ferramentas e por consequência a vida útil das ferramentas nesta aplicação.

Com este trabalho, as ferramentas preparadas e a validação experimental dos ensaios de corte foi possível comprovar a elevada eficiência da micro fresagem em classes de metal duro utilizando as ferramentas esféricas de metal duro com revestimento de diamante em HF-CVD. Ficou demonstrado que o processo de corte foi quase sempre controlado e apresenta-se com uma solução capaz para operações de acabamento em algumas classe de metal duro. Em comparação com os processos tradicionais de rectificação e erosão é mesmo possível obter taxa de remoção de material superiores, com condições de acabamento de superfície da peça muito controladas $Ra < 0.3 \mu m$. Do ponto de vista económico não foi realizada nenhuma avaliação mas o resultado económico poderá não ser tão evidente pois o custo do processo de revestimento ainda tem valores elevados.

Após a realização dos ensaios para avaliar o comportamento da apara/qualidade das superfícies maquinadas e os ensaios de vida útil das ferramentas produzidas podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

- i. A realização dos ensaios e avaliação das aparas obtidas através de observação em SEM e microscopia óptica mostrou que o processo de corte e formação do material é estável, mesmo com condições de espessura de corte inferiores ao raio da ferramenta. Nunca foi detectada uma falha na formação e aparecimento do fenómeno de espessura crítica de apara. Pela observação das aparas, a condição mais instável utilizada, onde a profundidade de corte foi de $15 \mu m$, sendo o raio das arestas das ferramentas de $16 \mu m$, não mostrou alterações significativas na formação do material cortado, as aparas obtidas são de reduzida dimensão mas é possível detectar um processo de corte sempre similar. As aparas obtidas em todas as condições de corte têm uma formação característica de fresagem de materiais duros com a típica formação de apara em dente de serra. A dureza e as características das classes de metal duro usadas mostram que os fenómenos de espessura mínima da apara podem ser reduzidos, a explicação parece esta muito relacionada com o material, tem reduzida deformação e ao mesmo tempo é propício a fractura frágil.

- ii. O controlo do acabamento das superfícies maquinadas mostra não ser notória uma alteração do mecanismo de corte com impacto na superfície das peças maquinadas, mesmo com condições de avanço por dente e profundidade de corte baixas, $f_z < 0.006$ mm/z e $a_p < 0.015$ mm respectivamente. A rugosidade medida durante os ensaios apenas teve alterações significativas quando se fez variar os parâmetros de corte de largura de corte e o avanço por dente.
- iii. Na micro fresagem a variação da classe de metal duro do material a maquinar mostrou que a classe mais dura (menor teor de cobalto e tamanho de grão menor – Co10%-WC0.8) obtém valores de rugosidade menores nas mesmas condições da classe de metal duro de menor dureza ensaiada. Esta alteração pode não ser apenas pela dureza mas influenciada pelo tamanho do grão. As aparas recolhidas na comparação feita entre as duas classes de metal duro também mostraram um comportamento muito diferente.
- iv. Nos ensaios de vida útil com as ferramentas preparadas para este trabalho foi possível detectar uma evolução estável do desgaste em todas as soluções até valores de $VB_{máx} < 0.04$ mm. Valores superiores de $VB_{máx}$ quase todas as ferramentas apresentaram estabilidade com quebras catastróficas arestas. Com $VB_{máx} > 0.04$ mm as arestas na face de folga das ferramentas ficam quase sempre sem revestimento, nesta condições as ferramentas que são de metal duro não tem resistência e falham rapidamente.
- v. Nos ensaios realizados ficou detectado que o revestimento de diamante HF-CVD do Tipo A (MCD/NCD/MCD/NCD) apresentou uma vida útil muito superior aos restantes. A explicação parece estar na estrutura com maior tenacidade introduzida por camadas de estruturas NCD de espessura superior. O segundo melhor resultado também foi obtido pela estrutura com a segunda maior presença de NCD (TIPO B) o que parece reforçar a explicação apresentada.
- vi. O modo de falha de todas as ferramentas foi muito similar. Todas as ferramentas testadas apresentam uma delaminação da face de ataque logo nos primeiros minutos de trabalho. No entanto esta falha não compromete de imediato o desempenho da ferramenta. Mesmo sem revestimento na face de ataque todas as ferramentas mantêm o corte estável sem alterações na rugosidade das peças. A vida útil da ferramenta só é atingida quando o revestimento é eliminado na face de folga.
- vii. Nos ensaios foi possível verificar que uma das variáveis com grande impacto no desempenho das ferramentas é a preparação de arestas e superfícies. Alterações nestas variáveis podem aumentar substancialmente a resistência das arestas e a adesão do revestimento, provocando uma alteração significativa da vida útil da ferramenta. Esta conclusão é reforçada com o resultado dos ensaios realizados onde foi possível obter 3 vezes mais vida útil com uma alteração desta variável do processo e geométrica.

Como trabalhos futuros, está definido:

- i. Avaliar condições de espessura de apra menores do que as avaliadas identificando a resposta das ferramentas em várias classes de metal duro;
- ii. Determinar condições ótimas de raio de aresta;
- iii. Avaliar alterações nas condições geométricas das ferramentas;
- iv. Avaliar o comportamento de uma gama superior de ferramentas (exemplos: tóricas, de dimensões menores, etc.);
- v. Continuar a avaliar mais estruturas de revestimento HF-CVD e variáveis de processamento incluindo operações de pré-tratamento e pós-revestimento;
- vi. Avaliar comparação entre ferramentas em PCD e revestidas a HF-CVD;
- vii. Testar a aplicação a mais materiais ultra duros;
- viii. Avaliar estratégias de maquinagem e influência na eficiência do processo;
- ix. Estudar possíveis modelos constitutivos e simulação numérica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Flávia Aparecida De - **Diamante CVD nano- e microcristalino para corte de materiais abrasivos**. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2007

ALMEIDA, Flávia Aparecida De - **Diamante CVD nano e microcristalino para corte de materiais abrasivos** [Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2007 Disponível em WWW:<URL:<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/2313/1/2008000838.pdf>>.

ASTAKHOV, Viktor P. - The assessment of cutting tool wear. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 44:6 (2004) 637–647. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006.

ASTAKHOV, Viktor P. - Machining of Hard Materials – Definitions and Industrial Applications. Em **Machining of Hard Materials** [Em linha]. London : Springer London, 2011 Disponível em WWW:<URL:http://link.springer.com/10.1007/978-1-84996-450-0_1>. ISBN 978-1-84996-450-0. p. 1–32.

ASTAKHOV, Viktor P. - Machining of Hard Materials – Definitions and Industrial Applications. Em **Machining of Hard Materials** [Em linha]. Springer L ed. London : Springer London, 2011 Disponível em WWW:<URL:http://link.springer.com/10.1007/978-1-84996-450-0_1>. ISBN 978-1-84996-450-0. p. 1–32.

BARRY, John; BYRNE, Gerald - The Mechanisms of Chip Formation in Machining Hardened Steels. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. . ISSN 10871357. 124:3 (2002) 528. doi: 10.1115/1.1455643.

BELMONTE, M. *et al.* - Adhesion behaviour assessment on diamond coated silicon nitride by acoustic emission. **Diamond and Related Materials**. . ISSN 09259635. 12:3–7 (2003) 733–737. doi: 10.1016/S0925-9635(02)00305-9.

BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; CHIFFRE, L. DE - Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 167:2–3 (2005) 201–207. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.05.029.

BOBZIN, Kirsten - High-performance coatings for cutting tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. . ISSN 17555817. 2016 (2016). doi: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.

BOUZAKIS, K. D. *et al.* - Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. . ISSN 17555817. 7:3 (2014) 264–273. doi: 10.1016/j.cirpj.2014.05.003.

BRANDT, Gunnar - Ceramic Cutting Tools, State of the Art and Development Trends. **Materials Technology**. . ISSN 1066-7857. 14:1 (1999) 17–22. doi: 10.1080/10667857.1999.11752806.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKENA, B. - Advancing Cutting Technology. **CIRP Annals**. . ISSN 00078506. 52:2 (2003) 483–507. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60200-5.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. - Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 46:3–4 (2006) 313–332. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015.

CHENG, Kai; HUO, Dehong - **Micro-cutting: Fundamentals and applications**. ISBN 9781118536605.

COOK, M. W.; BOSSOM, P. K. - Trends and recent developments in the material manufacture and cutting tool application of polycrystalline diamond and polycrystalline cubic boron nitride. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. 18:2000) 147–152.

DAVIM, J. Paulo - **Machining of Hard Materials** [Em linha]. London : Springer London, 2011 Disponível em WWW:<URL:http://link.springer.com/10.1007/978-1-84996-450-0>. ISBN 978-1-84996-449-4.

DAVIM, J. Paulo - **Lasers in Manufacturing** [Em linha]. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2013 Disponível em WWW:<URL:http://doi.wiley.com/10.1002/9781118562857>. ISBN 9781118562857.

DENKINA, B.; BIERMANN, D. - Cutting edge geometries. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. . ISSN 17260604. 63:2 (2014) 631–653. doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.009.

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. - Recent Advances in Mechanical Micromachining. **CIRP Annals**. . ISSN 00078506. 55:2 (2006) 745–768. doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.006.

DUARTE, Pedro Gonalo Pereira - **Maquinao de metal duro pr -sinterizado com Duarte diamante CVD** [Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2013 Disponível em WWW:<URL:https://ria.ua.pt/bitstream/10773/11730/1/Dissertao.pdf>.

FERNANDES, C. M.; SENOS, A. M. R. - Cemented carbide phase diagrams: A review. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. . ISSN 02634368. 29:4 (2011) 405–418. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2011.02.004.

FLECK, N. A.; HUTCHINSON, J. W. - A phenomenological theory for strain gradient effects in plasticity. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**. . ISSN 00225096. 41:12 (1993) 1825–1857. doi: 10.1016/0022-5096(93)90072-N.

GEORGE, Schneider - **Cutting Tools Application** [Em linha]. [S.l.] : ASM International, 2002 Disponível em WWW:<URL:http://www.opensourcemachinetools.org/archive-manuals/Cutting-Tool-Applications.pdf>. ISBN 0615121918.

JAYAL, A. D. *et al.* - Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. . ISSN 17555817. 2:3 (2010) 144–152. doi: 10.1016/j.cirpj.2010.03.006.

JEON, Yongho; PFEFFERKORN, Frank - Effect of Laser Preheating the Workpiece on Micro end Milling of Metals. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. . ISSN 10871357. 130:1 (2008) 11004. doi: 10.1115/1.2783219.

KOLLMAN, Justin M. *et al.* - Microtubule nucleation by γ -tubulin complexes. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**. . ISSN 1471-0072. 12:11 (2011) 709–721. doi: 10.1038/nrm3209.

LACALLE, L. N.López De *et al.* - Chapter 2: Advanced Cutting Tools. Em DAVIM, J. PAULO (Ed.) - **Machining of Hard Materials**. London : Springer International Publishing, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4. p. 33–86.

LAI, Xinmin *et al.* - Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 48:1 (2008) 1–14. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011.

LEE, K. N. - Current status of environmental barrier coatings for Si-Based ceramics. **Surface and Coatings Technology**. . ISSN 02578972. 133–134:2000) 1–7. doi: 10.1016/S0257-8972(00)00889-6.

LIU, Kai; MELKOTE, Shreyes N. - Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process. **International Journal of Mechanical Sciences**. . ISSN 00207403. 49:5 (2007) 650–660. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2006.09.012.

LU, Xiaohong; LIANG, Steven Y. - A New Method for the Prediction of Micro-milling Tool Breakage. **International Manufacturing Science and Engineering Conference**. 12th:2017) 4–9.

MAMALIS, A. G.; KUNDRÁK, J.; HORVÁTH, M. - Wear and tool life of CBN cutting tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. . ISSN 02683768. 20:7 (2002) 475–479. doi: 10.1007/s001700200180.

MANAUD, J. P. *et al.* - A comparative study of CrN, ZrN, NbN and TaN layers as cobalt diffusion barriers for CVD diamond deposition on WC-Co tools. **Surface and Coatings Technology**. . ISSN 02578972. 202:2 (2007) 222–231. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.05.024.

MASUZAWA, T. - State of the Art of Micromachining. **CIRP Annals**. . ISSN 00078506. 49:2 (2000) 473–488. doi: 10.1016/S0007-8506(07)63451-9.

MATTHEWS, Allan - Handbook of Hard Coatings. **Tribology International**. . ISSN 0301679X. 34:3 (2001) 203–205. doi: 10.1016/S0301-679X(01)00021-4.

MELKOTE, S. *et al.* - Laser assisted micro-milling of hard-to-machine materials. **CIRP Annals**. . ISSN 00078506. 58:1 (2009) 45–48. doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.053.

MERCHANT, M.Eugene - Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 0021-8979. 16:6 (1945) 318–324. doi: 10.1063/1.1707596.

MUKHERJEE, Indrajit; RAY, Pradip Kumar - A review of optimization techniques in metal cutting processes. **Computers and Industrial Engineering**. . ISSN 03608352. 50:1–2 (2006) 15–34. doi: 10.1016/j.cie.2005.10.001.

NABHANI, Farhad - Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 115:3 (2001) 402–412. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00851-2.

NAKAYAMA, Kazuo; ARAI, Minoru; KANDA, Torahiko - Machining Characteristics of Hard Materials. **CIRP Annals**. . ISSN 00078506. 37:1 (1988) 89–92. doi: 10.1016/S0007-8506(07)61592-3.

NAKAYAMA, Kazuo; ARAI, Minoru; KANDA, Torahiko - Machining Characteristics of Hard Materials. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. . ISSN 00078506. 37:1 (1988) 89–92. doi: 10.1016/S0007-8506(07)61592-3.

NEE, Andrew Y. C. - **Re-engineering Manufacturing for Sustainability** [Em linha]. Singapore : Springer Singapore, 2013 Disponível em WWW:<URL:http://dx.doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2>. ISBN 978-981-4451-47-5.

NETO, M. - **Study of cobalt in synthetic diamond**. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2007

PIRES, Filipe De Sousa - **Diamante nanocristalino CVD sobre graus WC-Co submicrométricos**. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2011

PRATAS, Sérgio Rodrigo Marques - **Implementação de ferramentas de diamante CVD no fabrico de metal duro** [Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2015 Disponível em WWW:<URL:http://hdl.handle.net/10773/17182>.

RODRÍGUEZ, CJC - **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=NfRFEgFRmD4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Cutting+edge+preparation+of+precision+cutting+tools+by+applying+micro-abrasive+jet+machining+and+brushing&ots=Gg-

zYmpGzY&sig=q4ztuTawKtjrVKvtbx4ZHTPCho4%5Cnhttp://books.google.com/bo>. ISBN 9783899587128.

SARIN, Vinod - **Comprehensive hard materials**. [S.l.] : Newnes, 2014. ISBN 0080965288.

SENTHIL KUMAR, A.; RAJA DURAI, A.; SORNAKUMAR, T. - Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. **Tribology International**. . ISSN 0301679X. 39:3 (2006) 191–197. doi: 10.1016/j.triboint.2005.01.021.

SHAW, Milton Clayton; COOKSON, J. O. - **Metal cutting principles** [Em linha]. 2. ed. New York : OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2005 Disponível em WWW:<URL:www.oup.com>. ISBN 0-19-514206-3.

SÖDERBERG, Staffan; SJIISTRAND, Mats - Advances in coating technology for metal cutting tools. **Metal Powder Report**. . ISSN 00260657. 56:4 (2001) 24–30. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0026-0657(01)80174-0.

SONAWANE, Harshad A.; JOSHI, Suhas S. - Analytical Modeling of Chip Geometry in High-Speed Ball-End Milling on Inclined Inconel-718 Workpieces. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. . ISSN 1087-1357. 137:1 (2015) 11005. doi: 10.1115/1.4028635.

SPEAR, K. E.; DISMUKES, J. P. - **Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology** Electrochemical Society. [Em linha]. 3^a ed. New York : John Wiley & Sons, 1994 Disponível em WWW:<URL:https://books.google.pt/books?id=RR5HF25DB7UC>. ISBN 978-0-471-53589-8.

TANSEL, I. *et al.* - Micro-end-milling—II. Extending tool life with a Smart Workpiece Holder (SWH). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. . ISSN 08906955. 38:12 (1998) 1437–1448. doi: 10.1016/S0890-6955(98)00016-9.

TÖNSHOFF, H. K.; WOBKER, H. G.; CASSEL, C. - Wear Characteristics of Cermet Cutting Tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. . ISSN 17260604. 43:1 (1994) 89–92. doi: 10.1016/S0007-8506(07)62171-4.

UDDIN, M.Sharif *et al.* - Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon. **Wear**. . ISSN 00431648. 257:7–8 (2004) 751–759. doi: 10.1016/j.wear.2004.03.012.

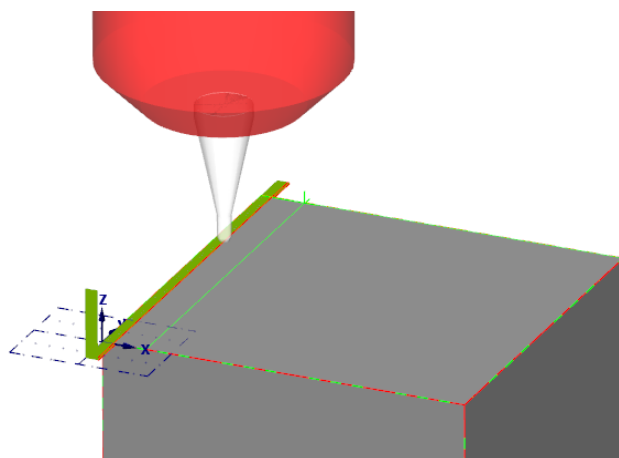
VENTURA, C. E. H.; KÖHLER, J.; DENKANA, B. - Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. **Journal of Manufacturing Processes**. . ISSN 15266125. 19:2015) 129–134. doi: 10.1016/j.jmapro.2015.06.010.

VINET, Luc; ZHEDANOV, Alexei - A «missing» family of classical orthogonal polynomials. **Micro-Cutting: Fundamentals and Applications**. . ISSN 1098-6596. 2010) 1–348. doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.

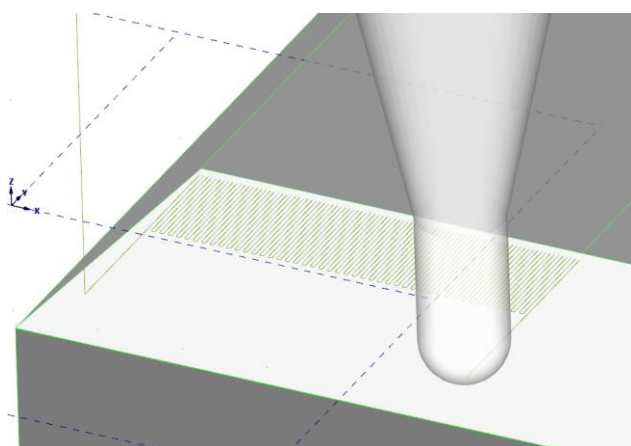
WYEN, Carl Frederik; KNAPP, Wolfgang; WEGENER, Konrad - A new method for the characterisation of rounded cutting edges. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. . ISSN 02683768. 59:9–12 (2012) 899–914. doi: 10.1007/s00170-011-3555-4.

ZHANG, Y. F. *et al.* - The roles of argon addition in the hot filament chemical vapor deposition system. **Diamond and Related Materials**. . ISSN 09259635. 10:8 (2001) 1523–1527. doi: 10.1016/S0925-9635(01)00383-1.

ANEXO 1



(A)



(B)

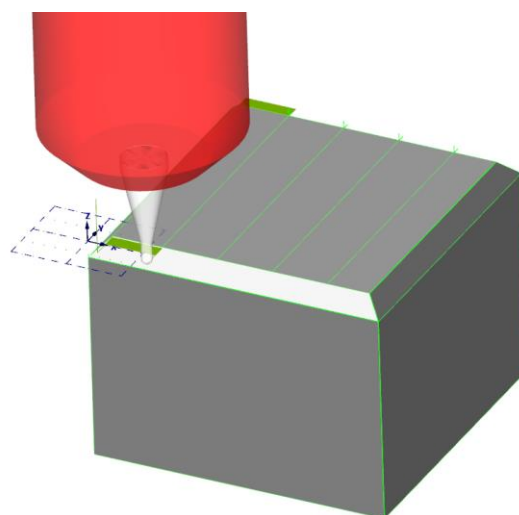


Figura A. 1- Representação da estratégia utilizada para os ensaios de avaliação da apara (A) e ensaios de vida útil (B) (MASTERCAM 2017)

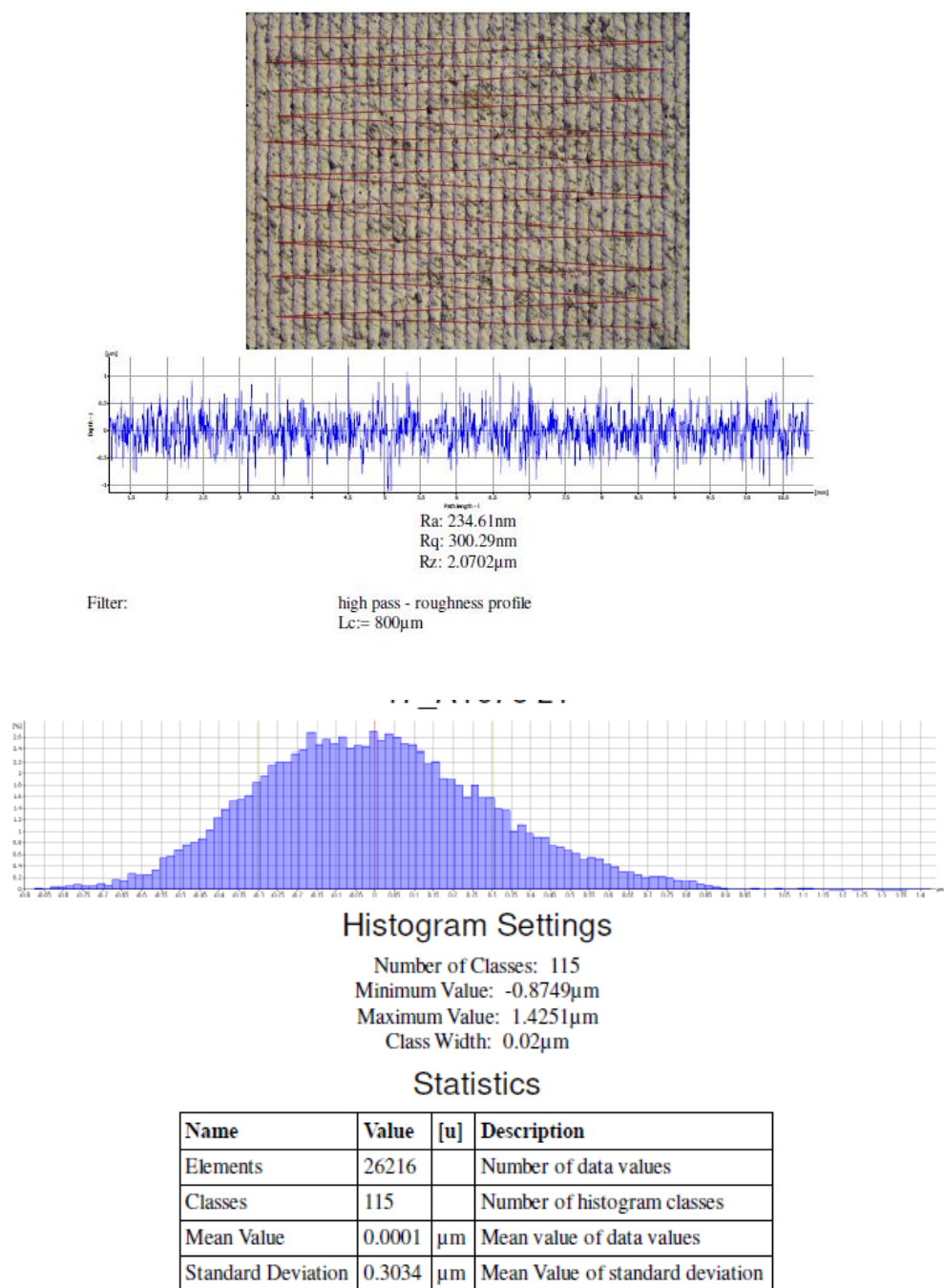


Figura A. 2– Exemplo do procedimento de medição dos parâmetros da rugosidade Ra e RMS

ANEXO 2

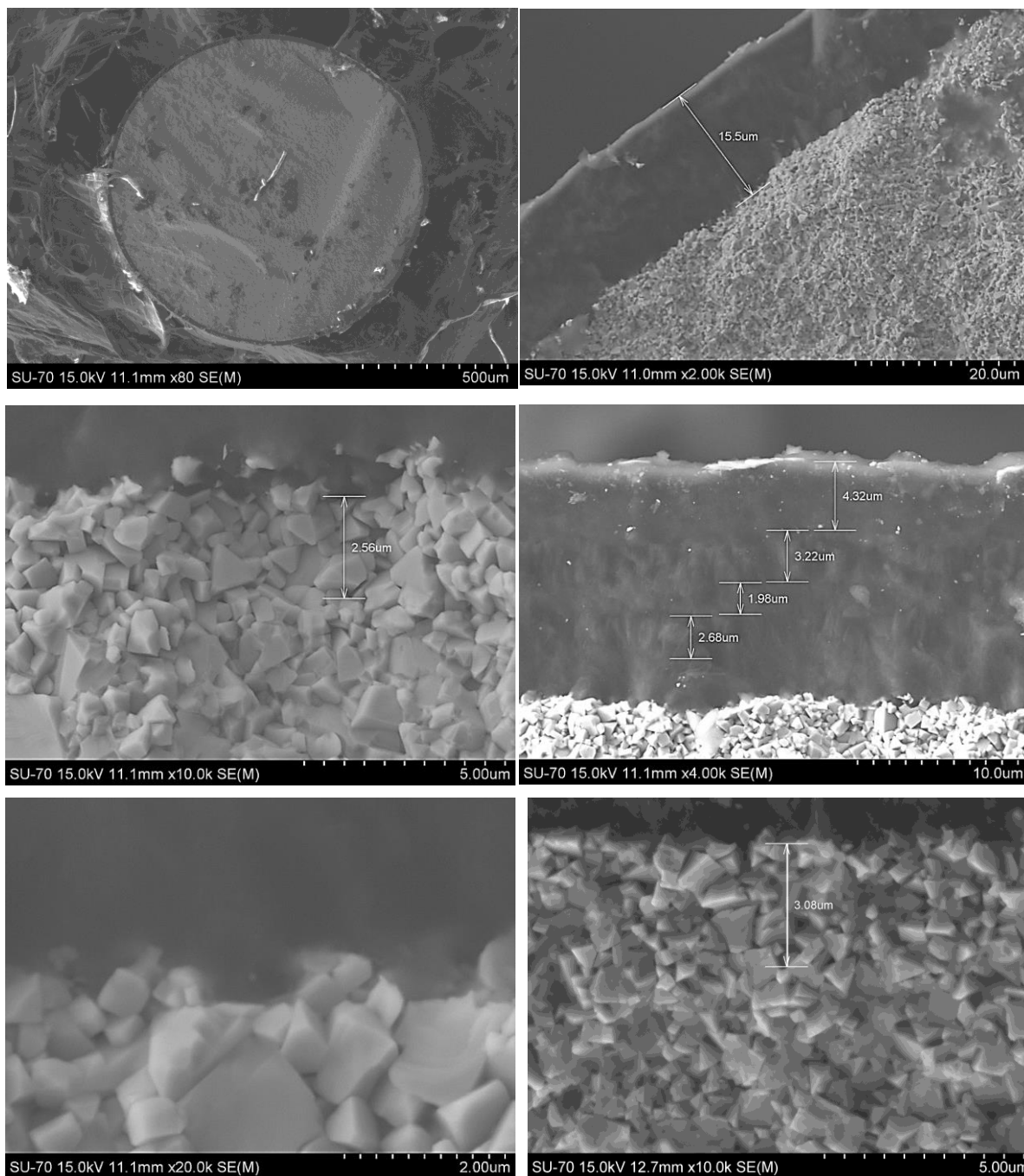


Figura A. 3– Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo A

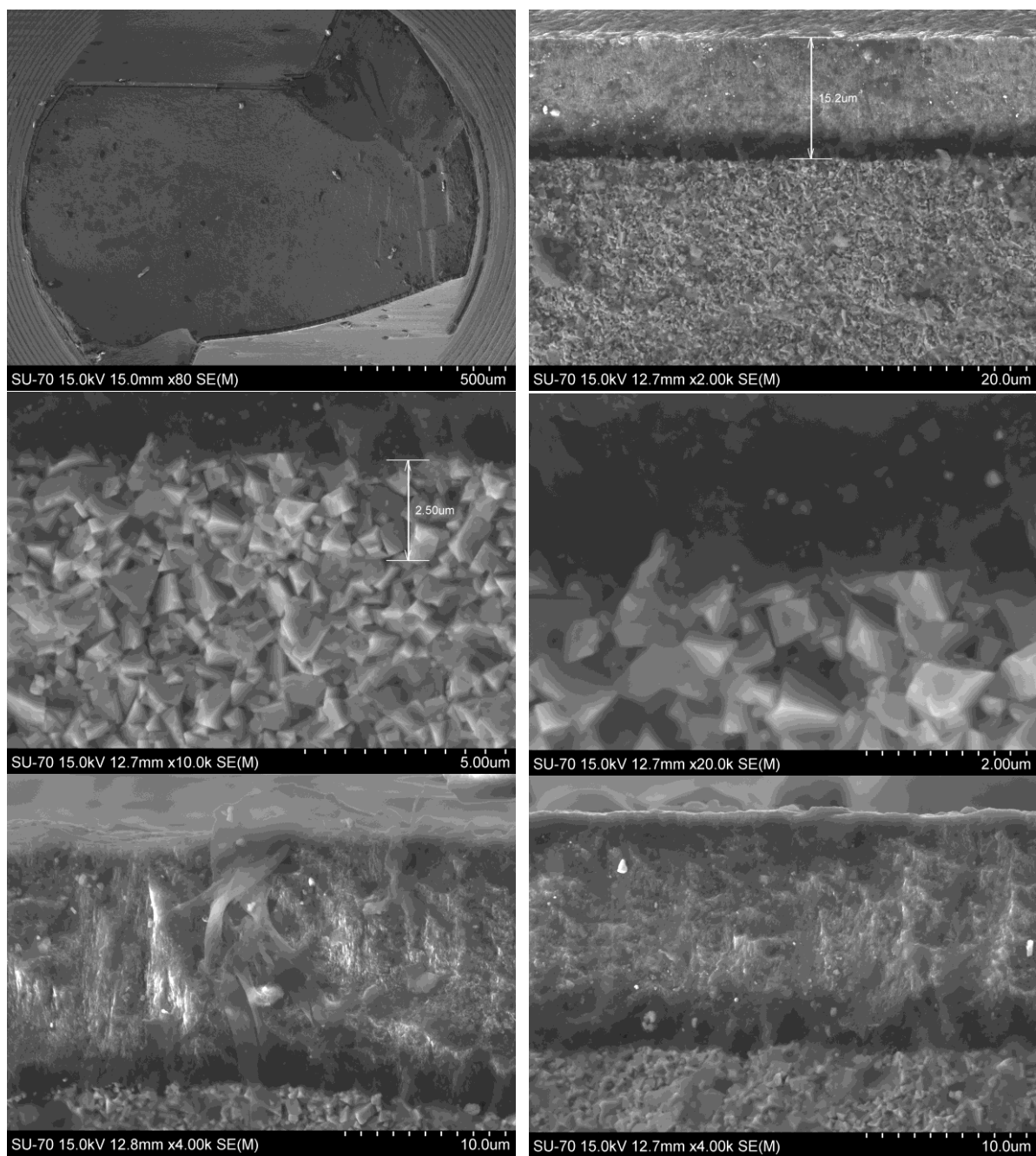


Figura A. 4—Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo B

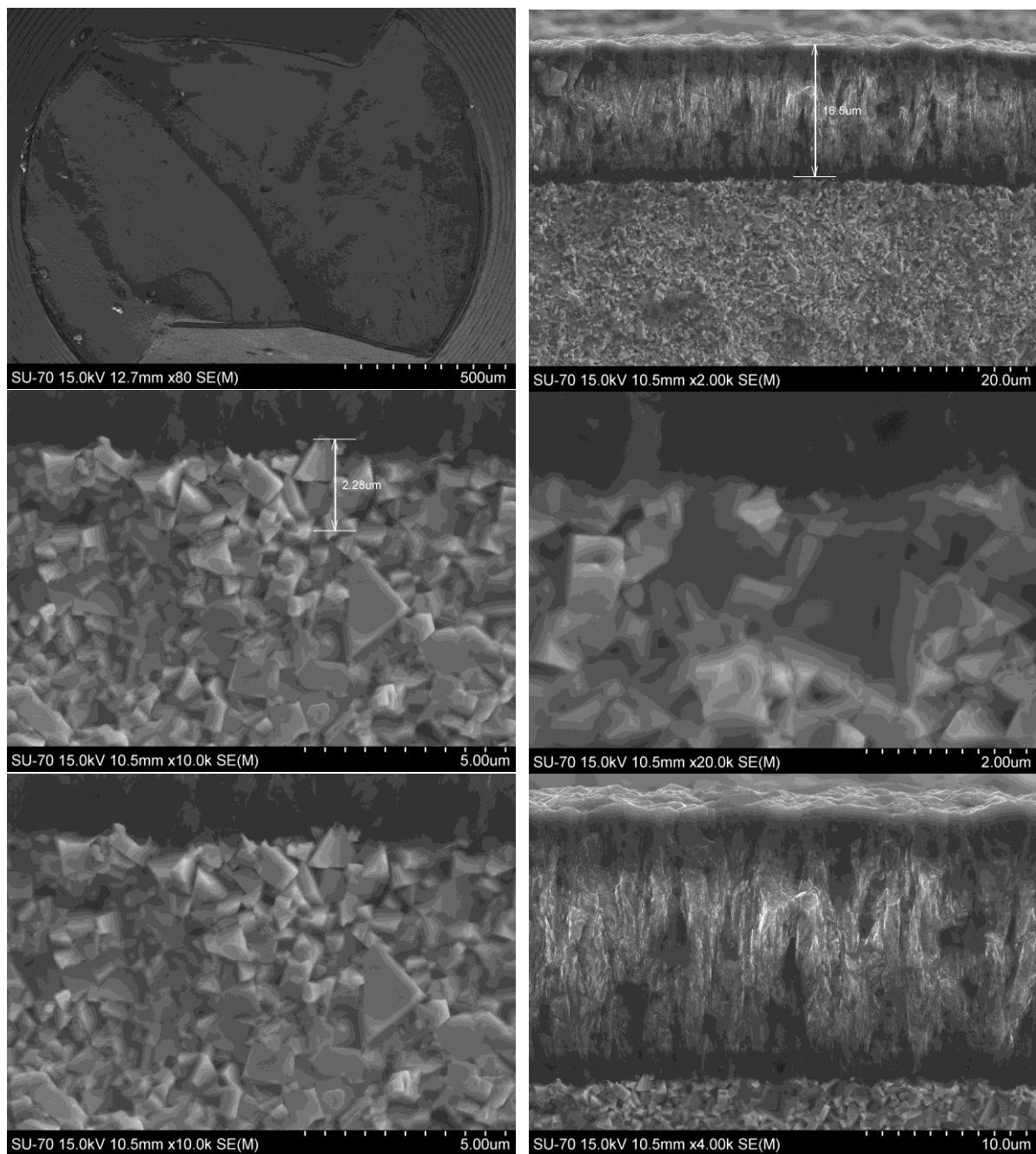


Figura A. 5– Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo C

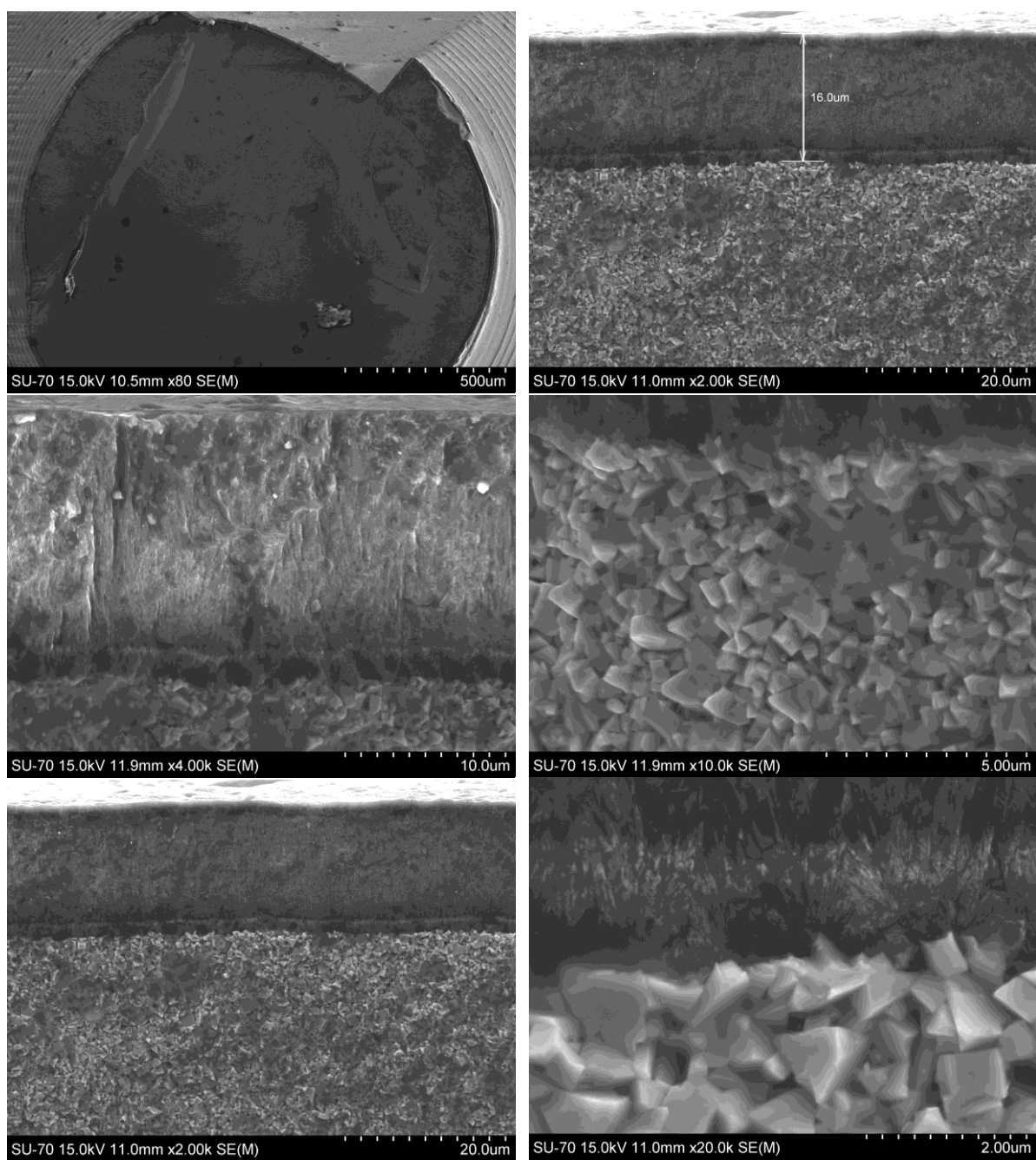


Figura A. 6– Compilação de imagens da análise do revestimento diamante Tipo D

ANEXO 3

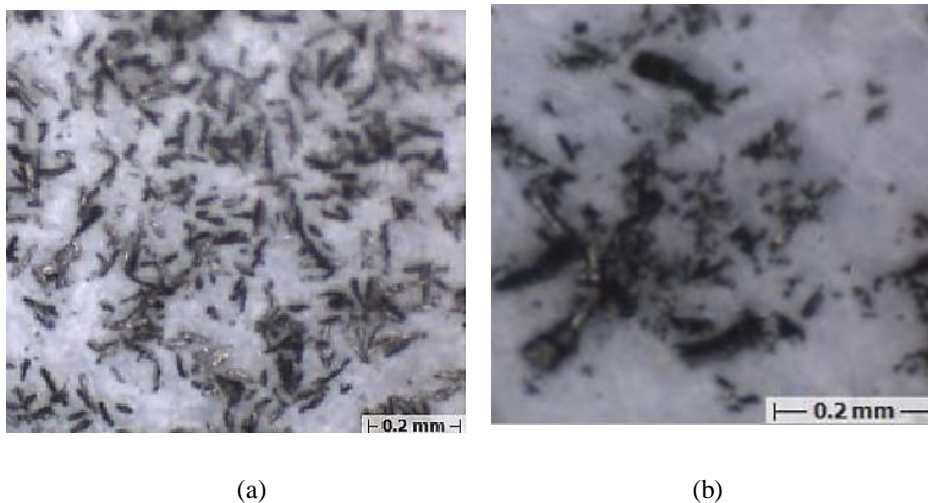


Figura A. 7– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $a_p = 0,015$ mm ; (b) $a_p = 0,05$ mm

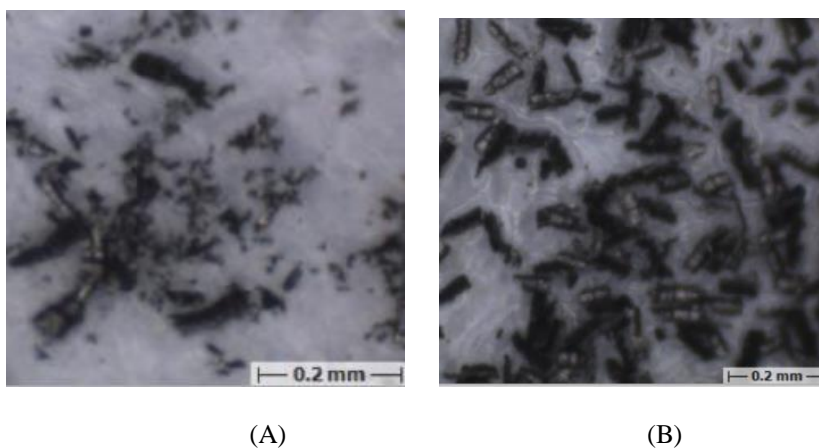


Figura A. 8– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $V_c = 30,5$ m/min ; (b) $V_c = 54,8$ m/min

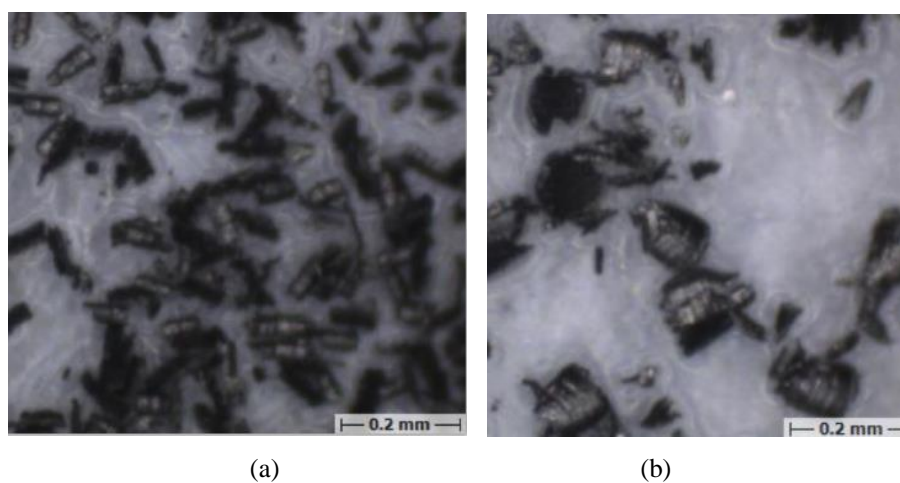
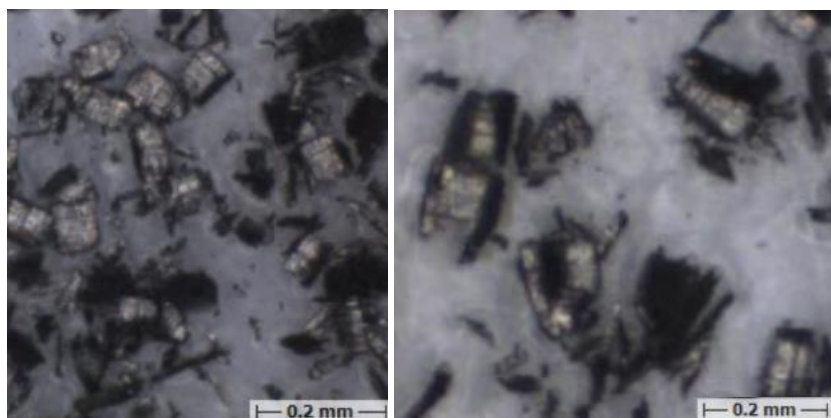


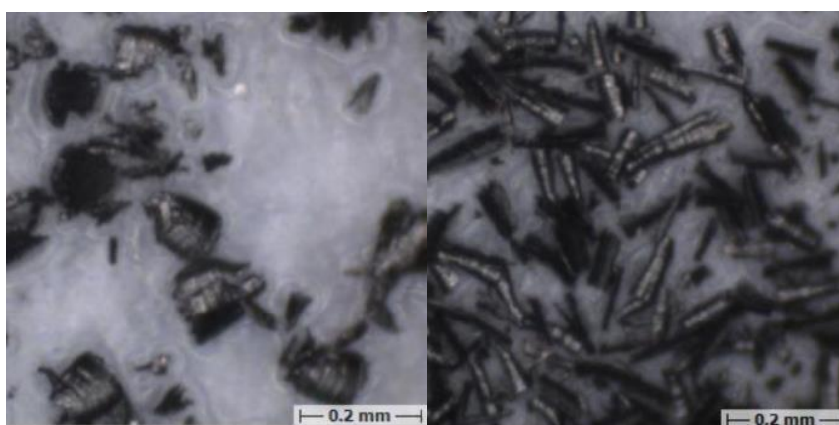
Figura A. 9– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $a_e = 0,02$ mm ; (b) $a_e = 0,11$ mm



(a)

(b)

Figura A. 10– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) $fz= 0,006 \text{ mm/z}$; (b) $fz=0,012 \text{ mm/z}$



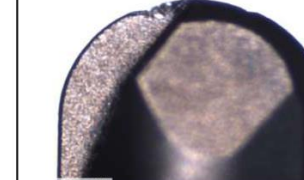

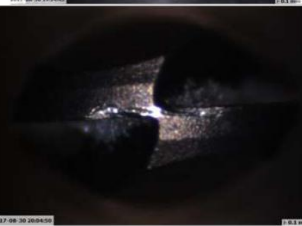


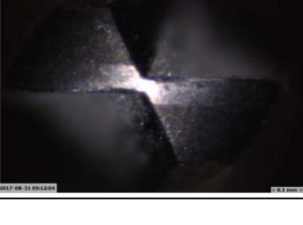







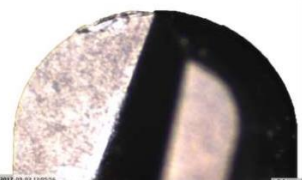

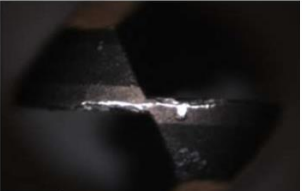
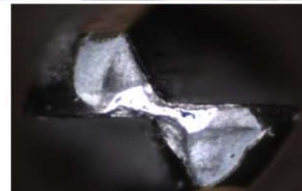
(a)

(b)

Figura A. 11– Imagens amplificadas 128x das aparas : (a) CLASSE 1(Co15% -- WC3,0) ; (b) CLASSE 1(Co10%-- WC0,8)

Tabela A. 1- Compilação de imagens da monitorização do desgaste durante o ensaio de vida útil na fresagem de Classe 1 (Co15%-WC3,0)

		Vc (m/min)	n (rpm)	Dci (mm)	ap (mm)	fz (mm/t)	Vf (mm/min)	ae(mm)	Fresagem é cópia na Classe 1 (Co=15%-WC=3,0µm) concondante/discordante -Corte a Seco com fluxo de ar a 5 bar
		54,8	40000	0,44	0,05	0,006	480,00	0,05	
		6 min			24 min				
5.5.1	TIPO A (S/MCD/NCD/MCD/NCD)								
									
5.5.2	Tipo B (S/ NCD/ MCD/NCD/MCD/NCD)								
									
5.5.3	Tipo C (S/NCD/MCD/NCD)								
									

<p>5.5.4</p>	<p>Tipo D (S/MCD/NCD/MCD/NCD)</p>	<div>   </div> <p>T=18 min</p> <div>   </div>	
--------------	-----------------------------------	---	--